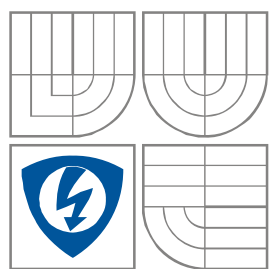


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

AUTOMATIZACE MĚŘENÍ ZENEROVÝCH REFERENCÍ

MEASUREMENT PROCESS AUTOMATIZATION OF ZENER REFERENCE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. TOMÁŠ BÁBEK

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MARIE HAVLÍKOVÁ, Ph.D.



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Tomáš Bábek

ID: 78456

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Automatizace měření Zenerových referencí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vypracujte rozbor nejistot porovnání dvou Zenerových referencí včetně možných zdrojů nejistot vstupujících do měření.
2. Navrhněte postupy a vypracujte softwarové řešení pro automatické měření Zenerových referencí v souladu s požadavky externího pracoviště.
3. Proveďte měření napětí a chyb na sestavě tří Zenerových referencí zapojených pomocí scanneru.
4. Vypočítejte výsledné hodnoty Zenerových referencí a chyb scanneru.
5. Naměřené hodnoty porovnejte s hodnotami naměřenými pomocí Josephsonova kvantového etalonu napětí.
6. Dbejte pokynů odborného konzultanta.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Guide to the expression of uncertainty measurement, IOS 1995, ISBN 92-67-10188-9
- [2] BOHÁČEK, J. Metrologie elektrických veličin, Vyd.1, Praha, ČVUT, 1994, 238 s.
- [3] Dle pokynů vedoucí práce a konzultanta z ČMI Brno

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 23.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Marie Havlíková, Ph.D.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce se zabývá metrologií se specializací na stejnosměrné napětí. V úvodu práce jsou vysvětleny pojmy z oboru metrologie, přehled jednotek SI a vysvětlení pojmu etalonu a jeho druhů. Jsou zde popsány primární etalony stejnosměrného napětí na fyzikálních principech Zenerovy diody a Josephsonova jevu.

Ve spolupráci s Metrologickým ústavem ČMI Brno je tato práce zaměřena na automatizaci měření Zenerových referencí (ZRS). Jejím cílem je zautomatizovat měření Zenerových referencí a jejich propojení s Josephsonovým napětím (JVS) pomocí skeneru. Pro toto je zapotřebí zjistit offsety, které můžou vzniknout na kanálech skeneru. Je tu vytvořen teoretický rozbor měření na skeneru a jejich nejistot.

Cílem řešení je výpočet offsetů kanálů skeneru z každodenního automatického měření soustavy Zenerových referencí (ZRS).

Pro měření byl použit program LabView a pro výpočet dat z naměřených hodnot program Matlab.

Tato práce má časově ulehčit při měření referencí stejnosměrných napětí a změřit hodnoty etalonů stejnosměrného napětí a stanovit offsety kanálů na skeneru. V jejím závěru jsou shrnuty offsety naměřené na jednotlivých kanálech skeneru.

Klíčová slova

Metrologie, etalon, stejnosměrné napětí, reference, JVS, ZRS, skener, offset.

Abstract

This thesis deals with metrology specialized to DC voltage. In the beginning of thesis is explanation of technical terms from metrology, summarization of units from International System and explanation of the standards and its kinds in the context of metrology. Primary standards of DC voltage based on Zener diodes and Josephson effect are described as well.

In cooperation with Czech metrology institute in Brno this work is focused on automatization of measuring Zener reference standards (ZRS). Goal of this project is to automatize the measuring of Zener reference standards and its relationship with Josephson voltage system using scanner. To do this, there is a need to find out offsets, that can develop on scanner's channels. There is a theoretical analysis of measuring made on the scanner and their uncertainties.

Aim of the solution is computation of scanner channels offsets using everyday automatic measuring the system of Zener reference standards (ZRS).

For measuring the LabView was used and for computing the data from measured values the Matlab was used.

This thesis should short the time needed when measuring DC voltage references, measure values of DC voltage standards and set the scanner channels offsets. In the end there is a summarization of offsets measured on individual scanner channels.

Keywords

Metrology, standard, DC voltage, reference, JVS, ZRS, scanner, offset.

Bibliografická citace:

BÁBEK, T. *Automatizace měření Zenerových referencí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 54 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marie Havlíková, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Automatizace měření Zenerových referencí* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: **23. května 2011**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Marii Havlíkové, Ph.D. a mému konzultantovi Ing. Martinu Šírovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **23. května 2011**

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod	10
2	Metrologie	12
2.1	Metrologie se vyvíjí	12
2.2	Obory Metrologie	12
2.3	Jednotky SI	13
2.3.1	Základní jednotky SI	13
2.3.2	Odvozené jednotky SI	13
2.4	Etalony	14
2.4.1	Druhy etalonů	15
3	Metrologie stejnosměrného napětí	16
3.1	Elektrické napětí U	16
3.2	Etalony	17
3.2.1	Westonovy články	17
3.2.2	Zenerovy diody	17
3.2.3	Josephsonův jev	18
4	Etalony stejnosměrného napětí na ČMI	22
4.1	Používané Zenerovy reference na ČMI	23
4.2	Postup měření	23
4.2.1	Měření dvou etalonů stejnosměrného napětí	23
4.2.2	Měření Josephsonova jevu	25
5	Rozbor porovnávání Zenerových referencí	27
5.1	Popis systému 2 Zenerových referencí	27
5.2	Výpočet napětí ΔE a $\Delta E'$	28
5.2.1	Výpočet hodnot 2P pro 3 reference	28
5.2.2	Výpočet hodnot 2P pro 4 reference	29
6	Nejistoty v porovnávání Zenerových referencí	31
6.1	Rozbor chyb měření	31
6.2	Nejistoty typu A	32
6.3	Nejistota typu B	32
6.4	Kombinovaná nejistota	33
6.5	Úbytek napětí na přívodním kabelu	33
6.5.1	Svodový odpor	33
6.5.2	Vlastní odpor kabelu	34

6.5.3	Úbytek napětí	34
6.6	Základní chyba Keithley 2182.....	35
6.7	Celková nejistota při měření.....	36
7	Program pro měření a výpočet ZSR	38
7.1	Měření ZRS v LabView	38
7.2	Zpracování dat v prostředí Matlab.....	44
8	Měření ZSR	46
9	Závěr.....	50

1 ÚVOD

Národní etalony stejnosměrného napětí jsou v ústavech Metrologie řešeny dvěma způsoby. První je soustava Zenerových referencí (ZRS – Zener reference standards), druhý způsob řešení je pomocí Josephsonova napětí (JVS – Josephson voltage system).

V Metrologickém ústavu ČMI v Brně se také využívají oba způsoby uvedeného řešení. Systém JVS slouží k odvození jednotky stejnosměrného napětí (z času), ale nelze jej samostatně použít z důvodu obtížnosti přenosu stejnosměrného napětí na kalibrátory a multimetry. Dalším podstatným důvodem pro využití ZRS je finančně náročný provoz systému JVS.

Z těchto obou výše uvedených důvodů se využívá soustava ZRS, která je složena z více etalonů stejnosměrného napětí na principu Zenerových diod.

Soustava Zenerových referencí může poskytnout stejnosměrné napětí kdykoli, s dostatečnou přesností (vyhovující nejistotou) pro kalibraci většiny kalibrátorů a multimetrů. Soustava se používá k udržení stejnosměrného napětí pravidelným porovnáváním a měřením rozdílu napětí mezi jednotlivými ZRS.

Nutností je, aby alespoň jeden člen ze soustavy ZRS byl zkalibrován pomocí JVS k získání jeho absolutní hodnoty.

K propojení ZRS a JVS i k zautomatizování měření rozdílů napětí mezi jednotlivými ZRS je nutné použít napěťový skener. Zapojení skeneru pro měření ZRS je nekompatibilní se zapojením pro měření JVS. I když propojení vodičů na skeneru je možno měnit, není žádoucí toto provádět často z důvodů možného zlomení vodičů a nebo zvýšení offsetu, které může nastat na svorkovnici. I když existuje společné zapojení pro obě měření, je zde problém ve vznikajícím offsetu na skeneru při měření JVS. Proto je třeba tyto offsety na skeneru znát buď měřením, nebo výpočtem z měření. Jelikož měření pomocí JVS je pracné a zdlouhavé, je vhodné tyto offsety stanovit již při prováděném měření na soustavě ZRS. V této práci se zabývám druhým řešením, které určí offsety při měření ZRS.

K zautomatizování měření rozdílů napětí mezi jednotlivými ZRS je nutné jejich připojení k napěťovému skeneru a nanovoltmetru.

Jelikož v tomto systému jsou reference propojeny pomocí skeneru, je třeba průběžně zaznamenávat chyby vznikající na něm. Tento systém se proměřuje dvakrát denně pomocí principu měření negativní metodou, která je vhodná při měření malého rozdílu napětí mezi referencemi, a při kterém se dají eliminovat některé nežádoucí napětí (např. termoelektrické), což je popsáno v této práci. Stávající měřicí program Voltref používaný na ČMI Brno nedokáže stanovit chyby na skeneru na jednotlivých kanálech.

Protože měření těchto chyb pomocí Josephsonova jevu je zdlouhavé a pracné, nehodí se na pravidelnou kontrolu skeneru. Proto je vhodné vypočítat tyto hodnoty

z hodnot při měření ZRS. Vhodné by bylo, kdyby tato měření probíhala automaticky a uživatel by mohl jen porovnávat výsledky, které by se ukládali pro časovou analýzu jak skeneru tak samotných referencí.

Hlavním cílem této práce bylo propojení jednotlivých měření s JVS. Je proveden výpočet a ověření chyby na skeneru, vyjádřené podle rovnic v této práci, které se získají z měření pomocí referencí ZRS, a následným porovnáním s měřením JVS.

2 METROLOGIE

Metrologie je věda o měření a plní tři hlavní úkoly:

- Definování mezinárodně uznávaných jednotek měření, jako je například metr,
- Realizace jednotek měření pomocí vědeckých metod, například realizace metru s využitím laserových paprsků,
- Vytváření řetězců návaznosti při dokumentování přesnosti měření.

Metrologie se rozvíjí s rozvojem vědy, slouží k potřebám podniků, institucí, laboratoří a jiných organizací využívajících metrologii.

Metrologie se zabývá poznatky, které jsou blízké jen málo lidem, ale většina lidí je používá, protože každý zná pojmy jako metr, kilogram, litr, watt atd. Metrologie propojuje lidské činnosti navzájem napříč zeměpisnými a profesními hranicemi. [1], [2]

2.1 Metrologie se vyvíjí...

Základem rozvoje metrologie je vědecký výzkum, přičemž samotná metrologie má zásadní význam pro vědecký výzkum.

Metrologie se dělí do několika kategorií, přičemž v Evropské unii se metrologie člení do tří kategorií s různým stupněm složitosti, oblasti užití a přesnosti:

- Fundamentální metrologie - zabývá se organizací a vývojem etalonů a jejich uchováváním (nejvyšší úroveň),
- Průmyslová metrologie - zajišťuje náležité fungování měřidel používaných v průmyslu a ve výrobních a zkušebních procesech,
- Legální metrologie – zabývá se přesností měření tam, kde měření mají vliv na ekonomické transakce, zdraví a bezpečnost.

Fundamentální metrologie představuje nejvyšší úroveň přesnosti, přestože není v mezinárodním měřítku definována. Fundamentální metrologii lze proto popsat jako vědeckou metrologii doplněnou o ty části legální a průmyslové metrologie, které vyžadují vědeckou kompetenci. [1]

2.2 Obory Metrologie

Fundamentální metrologie se člení do 11 oborů: hmotnost, elektřina, délka, čas a frekvence, termometrie, ionizující záření a radioaktivita, fotometrie a radiometrie, průtok, akustika, látkové množství a interdisciplinární metrologie. [1]

Tabulka 1: Obory, podobory a typické etalony pro jednotlivé důležité úrovně měření. Pro informaci uveden jen obor „Elektřina a magnetismus“.[1]

OBOR	PODOBOR	Důležité etalony
ELEKTRINA a MAGNETISMUS	Stejnoseměrný elektrický proud	Kryogenní komparátory proudu, kvantové etalony el. veličin, Zenerovy reference, potenciometrické metody, komparátorové mosty
	Střídavý elektrický proud	Měníče střídavého a stejnosměrného proudu, etalonové kondenzátory, vzduchové kondenzátory, etalony indukčnosti, kompenzátory
	Vysokofrekvenční elektrický proud	Tepelné měniče, kalorimetry, bolometry
	Velké proudy a vysoká napětí	Měřicí transformátory proudu a napětí, referenční zdroje vysokého napětí

2.3 Jednotky SI

2.3.1 Základní jednotky SI

Základní jednotkou je měřicí jednotka základní veličiny v dané soustavě veličin.

Definice a realizace každé základní jednotky SI se postupně upravuje s tím, jak metrologický výzkum odhaluje možnosti přesnější definice a realizace jednotky. Příkladem může být vývoj definice jednotky ampéru.

Ampér je stálý elektrický proud, který při průchodu dvěma rovnoběžnými, přímými, nekonečně dlouhými vodiči zanedbatelného kruhového průřezu, umístěnými ve vakuu ve vzdálenosti 1 m, vyvolá mezi nimi stálou sílu rovnou 2×10^{-7} newtonu na 1 metr délky vodičů. [1]

2.3.2 Odvozené jednotky SI

Odvozenou jednotkou je jednotka míry odvozené veličiny v dané soustavě veličin.

Odvozené jednotky SI jsou odvozeny od základních jednotek SI v souladu s fyzikální souvislostí mezi danými veličinami.

Tabulka 2: Odvozené jednotky SI se zvláštním pojmenováním a značkou. [1]

Odvozená veličina	Odvozená jednotka SI zvláštní pojmenování	Značka zvláštní značka	V jednotkách SI	V základních jednotkách SI
rozdíl elektr. potenciálu, elektromotorická síla	volt	V	W/A	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$

2.4 Etalony

Etalon je materiální míra, měřicí přístroj, měřidlo či měřicí systém určený k definování, realizaci, uchovávání a reprodukci jednotky, případně jedné či více známých hodnot určité veličiny, za účelem jejich přenosu porovnáním na jiné měřicí přístroje.

Etalon je charakterizovaný takto: [5]

1. Používá se výhradně k reprodukování a uchovávání jednotky (resp. jejího násobku či dílu) fyzikální (popř. technické) veličiny,
2. Má požadované (zpravidla předepsané) technické a metrologické vlastnosti a je vybaven předepsanou dokumentací,
3. Je atestovaný (kalibrovaný) příslušnou metrologickou institucí na základě předchozího stanovení (vyhodnocení) vybraných technických a metrologických vlastností a vyhlášen jako etalon; v předepsaných lhůtách je periodicky znovu kalibrován,
4. Je příslušnou metrologickou institucí evidován jako etalon,
5. Je používán stanoveným způsobem a určenými osobami, přičemž se o používání vede záznam,
6. Je uchováván stanoveným způsobem na stanoveném místě. Podobně jako je etalon uchováván, je podle určitých zásad ošetřován a kontrolován. Všechny tyto dílčí úkony zahrnujeme pod obecný pojem uchovávání etalonu.

2.4.1 Druhy etalonů

Základní rozdělení etalonů, se kterými je možno se setkat v metrologické praxi, je z pohledu nadřazenosti nebo podřazenosti etalonů téže veličiny podle hlediska hierarchie. Východiskem je přesnost reprodukce příslušné veličiny. [2], [4]

- Primární etalon - jsou to etalony, jejichž hodnoty lze s vysokou přesností počítat přímo z jejich konstrukčních parametrů příp. z fyzikálních konstant. Zabezpečuje reprodukci dané jednotky s největší současně dosažitelnou přesností. Má nejvyšší metrologické kvality ve stanovené oblasti. Protože primární etalon musí být v maximální míře chráněn před vlivy, které by mohly způsobit změny jednotky jím reprodukované, zavádí se další druhy etalonů,
- Sekundární etalon – je etalon v hierarchii etalonů podřazený etalonu primárnímu. Jeho hodnota byla stanovena navázáním na primární etalon,
- Referenční etalon - je to etalon nejvyšší přesnosti ve státě nebo v určitém místě, který je tam obvykle užíván jako primární etalon. Pro zabezpečení mezinárodní jednotnosti a správnosti se vytvářejí mezinárodní etalony. Hierarchicky nejvyšší etalony v rámci organizací jsou hlavní etalony (také referenční etalony),
- Pracovní etalon - (obvykle sekundární) je etalon určený ke kalibraci provozních měřidel, jeho hodnota je odvozována od příslušného hlavního etalonu. Aby se hlavní etalon co nejdéle uchoval v optimálním stavu, je účelné jej používat co nejméně. Protože přenos hodnot na hierarchicky nižší měřidla je mnohem častější, než je pro hlavní etalon žádoucí, vytvoří pracovní etalon pro tuto činnost jakéhosi prostředníka,
- Transferový etalon - je etalon používaný jako prostředek pro vzájemné porovnávání etalonů, materiálních měr nebo měřících přístrojů,
- Skupinový etalon - je soubor podobných materiálních měr nebo měřících přístrojů, zatímco samostatný etalon představuje jediné měřidlo. Skupinový etalon se používá při závislosti na mnoha průvodních veličinách, velkém rozptylu indikací a s omezenou životností (např. Westonovy články).

3 METROLOGIE STEJNOSMĚRNÉHO NAPĚTÍ

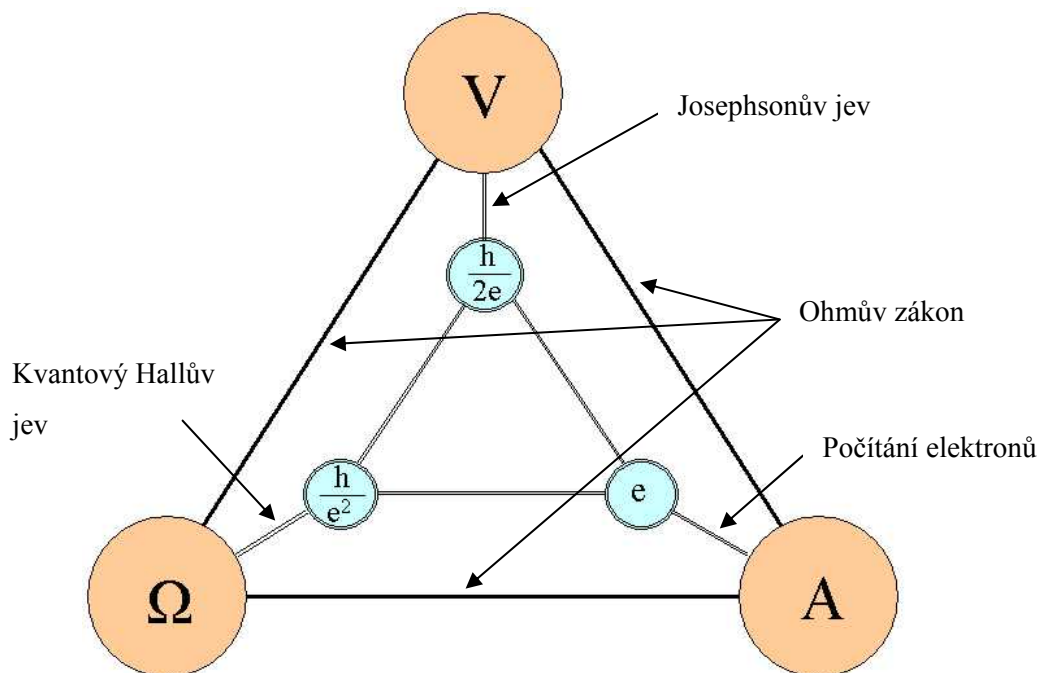
3.1 Elektrické napětí U

1 volt, V, je jednotka elektrického napětí (resp. elektrického potenciálu a elektromotorického napětí), je to napětí mezi dvěma body v prostoru v elektrickém poli, k jehož překonání potřebuje náboj 1 coulombu práci rovnou 1 joulu. Také se alternativně uvádí jako napětí, které při stejnosměrném proudu 1 ampéru spotřebovává výkon 1 wattu.

V praxi se používají dvě až tři desítky elektrických veličin. Primární etalony se obvykle vytvářejí pouze pro nejdůležitější z nich. Pro vyjádření vlastností elektrických signálů je to elektrické napětí a pro vyjádření vlastností elektrických prvků stejnosměrný elektrický odpor. Pro stejnosměrný proud, přesto že se jedná o základní jednotku soustavy, se primární etalony vyvíjí, např. počítáním elektronů.

Přístup k realizaci primárních etalonů v elektrotechnice je buď spíše teoreticko-fyzikální, upřednostňující základní veličiny v soustavě jednotek, to znamená v elektrotechnice jednotku stejnosměrného proudu ampér, nebo je technicko-praktický, hledající realizaci primárních etalonů pro nejčastěji používané jednotky v technické praxi. To je např. stejnosměrné napětí.

V elektrotechnice se používají primární etalony vytvořené na dvou základních principech: kvantový princip a princip vypočitatelnosti. [1]



Obrázek 1: Znázorňuje tzv. „elektrický trojúhelník“. Propojuje jednotky elektrických veličin se základními fyzikálními konstantami na základě konkrétních fyzikálních jevů.[1]

3.2 Etalony

3.2.1 Westonovy články

Dříve byly používány jako primární, referenční a pracovní etalony elektrického napětí. Při přesných měřeních elektrických veličin se dosud používají elektrochemické články v provedení navrženém E. Westonem. V současnosti se používají dva typy těchto článků - články s nasyceným elektrolytem CdSO_4 a články s nenasyčeným elektrolytem.

Výhodou Westonových etalonových článků nasyceného typu je výborná dlouhodobá stabilita několik μV za 10 let ze svého napětí. Jejich nevýhodou je však poměrně značný teplotní koeficient napětí, které je pod $10^{-5} \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ a dále to, že jsou velmi citlivé na otřesy při případné manipulaci nebo transportu. Napětí článků nenasyčeného typu časem klesá ($80\text{--}100\mu\text{V}/\text{rok}$), tím jsou méně stabilní, mají však podstatně menší teplotní koeficient napětí a jsou méně citlivé na otřesy.

Napětí Westonova článku nasyceného typu naprázdno je 1.0189 V . Vnitřní odpor článků je podle typu 100Ω až 1000Ω . Negativní vlastností těchto článků je hystereze po změnách teplot. Proto etalony z těchto článků se vytvářejí jako skupinové. Tyto etalony se nyní nahrazují polovodičovými etalony. [2]

3.2.2 Zenerovy diody

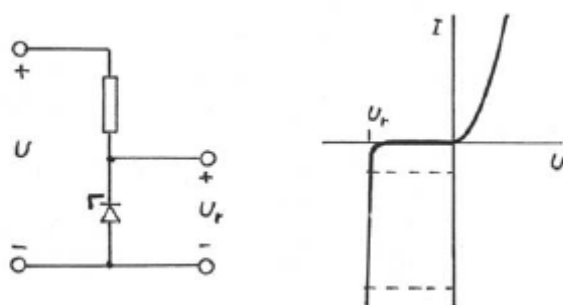
Zenerovy diody jsou polovodičové prvky, které se zapojují v závěrném směru. Zenerova dioda se zapojuje sériově s rezistorem, viz obrázek 2, na diodě vzniká stabilizované Zenerovo napětí U_r , které je možno použít pro účely etalonu. Zenerovo napětí je téměř konstantní pro určitý rozsah proudu, je závislé na teplotě a vykazuje jev stárnutí.

Pro lepší stabilizaci napětí se stabilizuje i proud procházející diodou.

Teplotní závislost se kompenzuje těmito způsoby: Zenerovou diodou s napětím okolo 7.2 V , u které je teplotní závislost minimální. Vytvořením modulu tvořeného Zenerovou diodou a běžnou diodou s opačným teplotním koeficientem než u Zenerovy diody na jednom čipu se dosáhne teplotní kompenzace.

Dále je čip vybaven teplotním čidlem a topným elementem pro udržení konstantní teploty čipu.

Pro vyšší stabilitu musí být většina přesných polovodičových etalonů napětí pod trvalým zatížením a napájením, jinak ztrácejí svou kalibrační hodnotu napětí. [2], [4]



Obrázek 2: Stabilizátor se Zenerovou diodou a jeho VA charakteristika.[4]

3.2.3 Josephsonův jev

B. D. Josephson roku 1962 teoreticky ukázal, že kontaktem tvořeným dvěma slabě vázanými supravodiči (např. oddělenými izolační vrstvou tloušťky řádově nm) může procházet stejnosměrný proud, aniž by to mělo za následek vznik stejnosměrného napětí mezi oběma supravodiči. K této situaci, kdy se kontakt s izolační vrstvou chová jako kompaktní supravodič, však dochází pouze v případě, že procházející proud nepřekročí jistou kritickou hodnotu. Po překročení kritického proudu se mezi oběma supravodiči objeví stejnosměrné napětí U a spojem začne protékat střídavý supraproud, jehož kmitočet f je s napětím U vázán vztahem

$$f = \frac{2e^-}{h} U \text{ kde,} \quad (3.1)$$

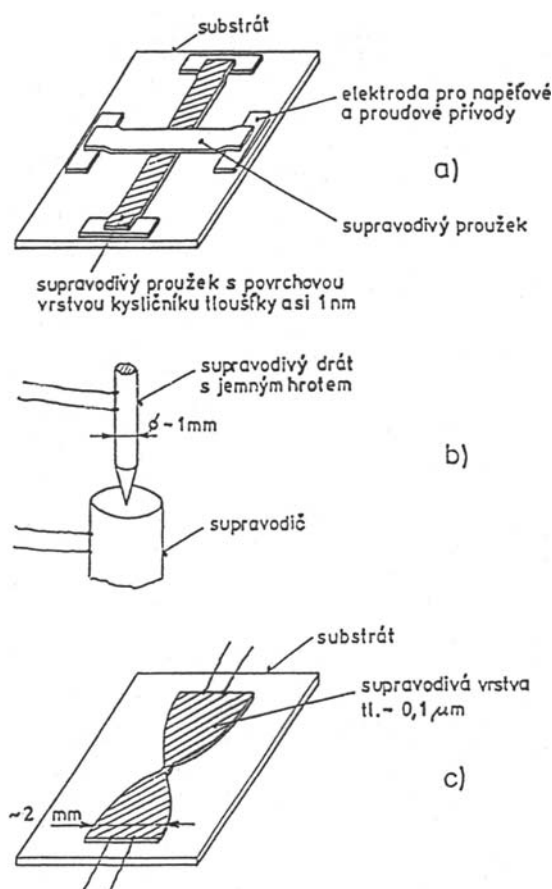
e^- - náboj elektronu,

h - Planckova konstanta,

f - kmitočet supraproudu.

Existence tohoto jevu byla brzy prokázána experimentálně. Vztah (3.1) platí nezávisle na použitých supravodičích a na způsobu, jak se dosáhne slabé vazby mezi nimi. [2], [4]

Na obrázku 3 je znázorněno několik uspořádání, která Josephsonův jev vykazují.



Obrázek 3: Typy Josephsonových kontaktů: a) tunelový spoj, b) hrotový kontakt, c) můstkový spoj.[2]

Mechanismus průchodu proudu z jednoho supravodiče do druhého spočívá v tunelování elektronů, sdružených do tzv. Cooperových párů, proto se toto uspořádání nazývá tunelový spoj.

Na obrázku 3a je supravodivý tunelový spoj, který je tvořen dvěma proužky supravodivého materiálu oddělenými vrstvou oxidu. Pro realizaci tohoto spoje se nejprve na substrát s předem napařenými elektrodami napaří spodní proužek supravodiče. Oxidací na vzduchu se na proužku vytvoří tenká vrstva oxidu a nakonec se napříč napaří vrchní supravodivý proužek. Vodiče pro přívod proudu ke spoji a pro měření napětí mezi proužky jsou připájeny k elektrodám.

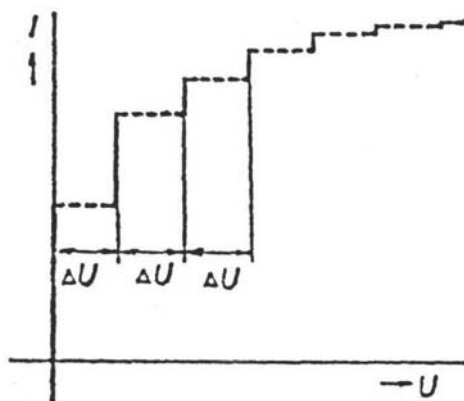
Obrázek 3b ukazuje další možné uspořádání tj. hrotový kontakt, který je tvořen jemným hrotem přitlačeným k supravodivé podložce. Kontaktní tlak lze nastavit mikrometrickým šroubem.

Josephsonův jev vykazuje i můstkový spoj podle obrázku 3c, tvořený tenkou vrstvou supravodiče se zúžením. Vzhledem k relativně velkým rozměrům zúžené oblasti jsou vlastnosti tohoto spoje podstatně horší než vlastnosti spojů tunelových a hrotových.

Jestliže Josephsonův přechod budeme ozařovat mikrovlnným zářením o kmitočtu f , dojde k vytvoření DC napětí, přičemž na voltampérové charakteristice kontaktu (viz obrázek 4) se objeví řada oblastí, v nichž se proud (v určitých mezích) neřídí stejnosměrným napětím, objeví se proudové stupně při napětích U_n . Tento jev nazýváme AC inverzní Josephsonův jev. [2], [4]

$$U_n = n \cdot \frac{h}{2e} \cdot f \quad \text{kde,} \quad (3.2)$$

- n - celé číslo,
- f - kmitočet supraproudu,
- h - Planckova konstanta,
- e - náboj elektronu.



Obrázek 4: Výsek volt-ampérové charakteristiky Josephsonova přechodu ozařovaného mikrovlnným zářením.[4]

Kmitočet f musí být blízký rezonančnímu kmitočtu přechodu a nabývá řádově desítek GHz.

Josephsonův kontakt je ideální převodník kmitočtu na napětí s převodním činitelem rovným celistvému násobku poměru $h/2e$. Kmitočet f lze měřit s nejistotou menší než 10^{-11} , takže o nejistotě napětí U_n rozhoduje hlavně nejistota, se kterou známe poměr $h/2e$.

Vzhledem k nejasnému určení poměru $h/2e$ byla hodnota v roce 1990 zafixována na $K_{J-90} = 4.835\,979 \times 10^{14} \text{ Hz} \cdot \text{V}^{-1}$. Nejistota K_{J-90} je 0.4 ppm, ale neuvažuje se.

Při překročení tloušťky izolační vrstvy se snižuje hodnota kritického proudu a nedochází k tunelování Cooperových párů, při malých tloušťkách izolační vrstvy Josephsonův jev nenastane.

Dosažitelné napětí U_n dosahuje pouze jednotek milivoltů. Uvedené vzorce dokazují, že pro dosažení vyšších napětí se musí použít vyšší frekvence mikrovlnného záření. Dostupné zdroje záření se používají pod kmitočet 100 GHz. Nejběžnější

pracovní frekvence mikrovlnného záření 75 GHz, což odpovídá výšce jednotlivých stupňů volt-ampérové charakteristiky Josephsonova kontaktu 155 μV . Pro vytvoření etalonu bylo zapotřebí vyššího napětí, které lze získat zařazením více Josephsonových kontaktů do série. Vyrábějí se ve formě mikrovlnných integrovaných obvodů jako pole s více než 20 000 Josephsonových kontaktů, tím vznikají etalony o napětí až 15V. [2], [4]

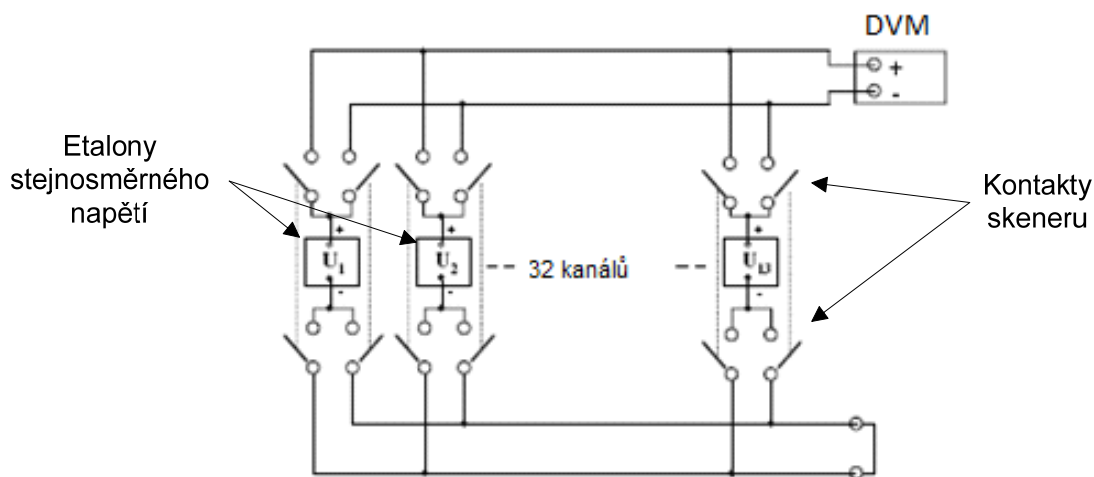
4 ETALONY STEJNOSMĚRNÉHO NAPĚTÍ NA ČMI

Pro zabezpečení správnosti mezinárodních etalonů se udržuje skupina etalonových článků napětí stejného typu. Často jsou užívány skupiny o počtu 3 až 6 článků uložených v laboratořích s měřenou teplotou vzduchu. Tyto články se kalibrují v pravidelných intervalech.

Pro malé skupiny je vhodné měřit všechny možné kombinace rozdílů mezi články. Počet měření však roste s vyšším počtem článků ve skupině (N je počet článků ve skupině).[7]

Za účelem usnadnění srovnání parametrů etalonů ve skupině jsou výstupní svorky etalonů trvale připojeny na vstupní kanály skeneru. Jak je znázorněno na obrázku 5, je skener nastaven tak, aby výběrem vhodných kanálů měřil rozdíl napětí mezi výstupy pro kterékoliv dvojice etalonu napětí. Tento rozdíl se měří pomocí digitálního nanovoltmetru (DVM) připojeného k výstupním svorkám skeneru.

DVM má mít vysoký činitel potlačení souhlasného rušení, protože je nutné měřit signály malé amplitudy (méně než $200\text{ }\mu\text{V}$), za přítomnosti velkého souhlasného signálu (přibližně 10V).



Obrázek 5: Schematické zapojení pro srovnání skupin etalonů napětí.[6]

Na ČMI jsou používány dva druhy etalonů stejnosměrného napětí založené na principu Zenerových diod a na Josephsonově jevu. Principiálně by stačilo provozovat etalon na principu Josephsonova jevu, protože tento princip je zatím nejpřesnější známý způsob, ale jeho provoz je finančně náročný (musí se chladit na nízkou teplotu atd).

Zenerových referencí je používáno šest, protože některé reference se odnáší na jiné pracoviště, a je třeba jich mít víc pro vzájemné porovnávání. Vzájemné měření mezi referencemi se provádí dvakrát denně (ráno a večer).

Jednou měsíčně se provádí měření s Josephsonovým etalonem kvůli časové nestálosti napětí Zenerových referencí.

4.1 Používané Zenerovy reference na ČMI

Datron 4910, Datron 4911 nebo F732A, F732B

Jedná se o napěťový referenční etalon Datron využívající polovodičové zdroje napětí. Má čtyři nezávislé výstupy 10 V, které jsou řazeny paralelně a jejichž napětí lze v případě potřeby měnit po krocích $1 \times 10^{-5}\%$. Uvedená napětí se navíc hardwarově průměrují a přivádějí ke zvláštním výstupům etalonu buď přímo, nebo přes oddělovací zesilovač, který může do čtyřvodičové zátěže dodat proud až 15 mA. Pro každý výstup 10 V je použit zvláštní referenční modul se Zenerovou diodou, která je vytvořena na společném čipu s diodou pro teplotní kompenzaci, teplotním čidlem a topným elementem pro udržování konstantní teploty čipu. Výstupní napětí modulu je kolem 7 V a na potřebnou hodnotu 10 V je zesilováno zesilovačem, u něhož se dostatečně stabilního zesílení dosahuje využitím techniky impulsové šířkové modulace. Obdobným způsobem se z napětí 10 V, získaného průměrováním vytvářejí zbývající dvě výstupní napětí etalonu - napětí 1,000 V a napětí 1,018 V. Výstup pro čtyřvodičové připojení zátěže má výstupní odpor menší než $100 \mu\Omega$, u všech ostatních výstupů je tento odpor 100Ω . Nejlepší stabilitu má výstupní napětí 10 V získané průměrováním. [2], [4], [12]

4.2 Postup měření

Níže je uveden popis metod používaných pro měření etalonů stejnosměrných napětí.

4.2.1 Měření dvou etalonů stejnosměrného napětí

Používá se negativní metoda. Pro tuto metodu je vhodný malý rozdíl mezi dvěma články, které jsou zapojeny negativně do série. Výsledné rozdílové napětí článků ΔE se měří vhodným přístrojem, viz obrázek 6.

V ideální situaci je rozdíl napětí:

$$\Delta E = U_1 - U_2 \text{ kde,} \quad (4.1)$$

U_1, U_2 - napětí porovnávaných článků.

V reálné situaci se může v obvodu objevit nežádané napětí P . Toto napětí se rozděluje do dvou typů:

1. Napětí P zůstává konstantní v intervalu měření pro skupinu,
2. Napětí P se rychle mění v závislosti na intervalu měření.

Pokud napětí P je druhého typu, bude mít za následek snížení přesnosti měření. Pokud je prvního typu, bude mít za důsledek systematickou chybu, což se projeví jako rozdíl napětí ΔE :

$$\Delta E = U_1 - U_2 + P \text{ kde,} \quad (4.2)$$

U_1, U_2 - napětí porovnávaných článků,

P - parazitní napětí.

Pomocí druhého měření, kdy se změní polarita článků, je možno odhadnout velikost parazitního napětí P (4.3) a sečtením rovnic (4.2) a (4.3) se obdrží dvojnásobná velikost parazitního napětí P (4.4).

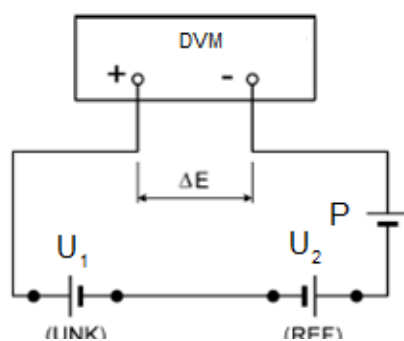
$$\Delta E' = U_2 - U_1 + P \quad (4.3)$$

$$2P = \Delta E + \Delta E' \quad (4.4)$$

Odečtením rovnic (4.2) a (4.3) dojde k eliminaci parazitního napětí P , toho se využívá při výpočtu hodnot etalonu stejnosměrného napětí.

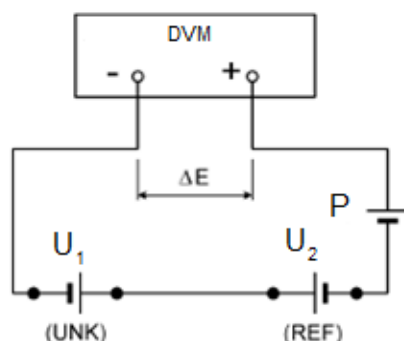
$$\Delta E - \Delta E' = 2(U_1 - U_2) \quad (4.5)$$

Zapojení článků pro vyhodnocení velikosti parazitního napětí P a hodnot etalonu stejnosměrného napětí, viz obrázek 6.



$$\Delta E = U_1 - U_2 + P$$

Negativní svorky článků
spojené spolu



$$\Delta E' = U_1 - U_2 + P$$

Pozitivní svorky článků
spojené spolu

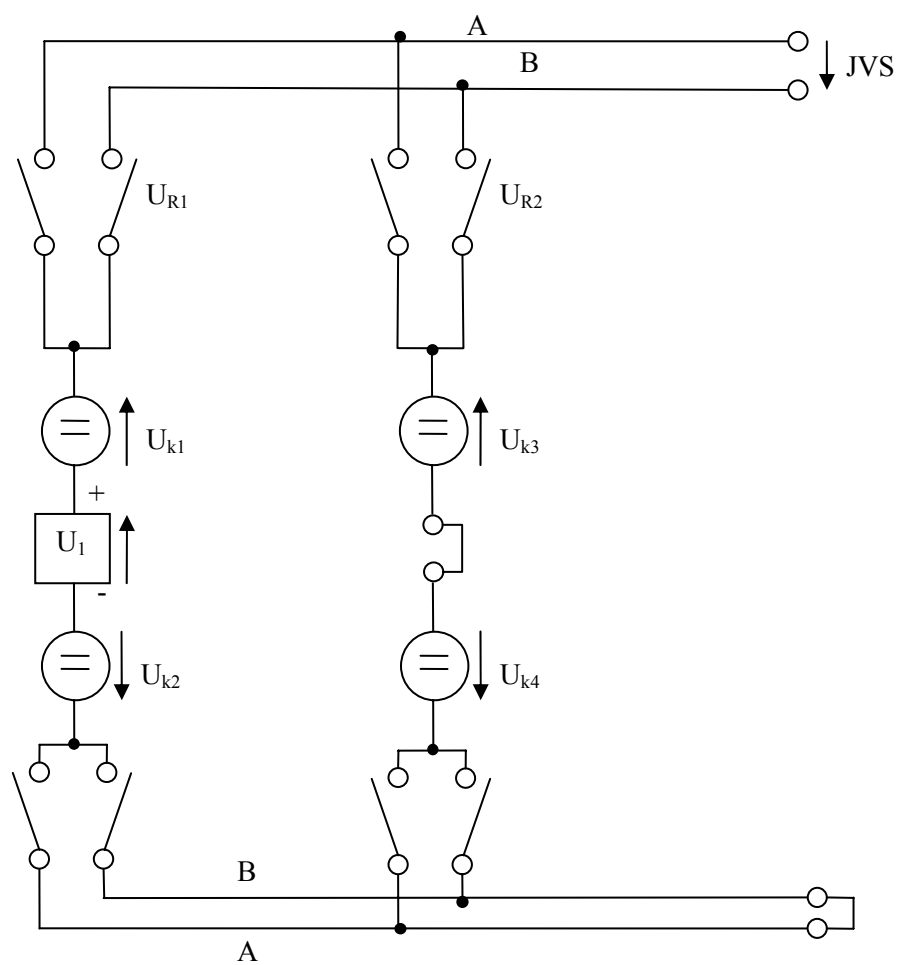
Obrázek 6: Dvě možnosti jak můžou být články spojeny v sérii.[7]

Tato kapitola se zabývá metodami pro dodržování kontroly skupin článků stejného typu. Tyto metody jsou navrženy tak, aby nesly informace o:

- stabilitě rozdílů v napětí ve skupině,
- závislosti přesnosti měření na vlivu prostředí nebo jiných vnějších vlivů,
- možné systematické chybě a odhadu přesnosti tohoto procesu.

4.2.2 Měření Josephsonova jevu

Při měření s Josephsonovým jevem se postupuje jako při měření dvou referencí, jak je uvedeno v následující kapitole 5.1 *Popis systému 2 Zenerových referencí*, jen místo jedné Zenerovy reference je zkrat. Toto měření se provede se všemi Zenerovými referencemi.

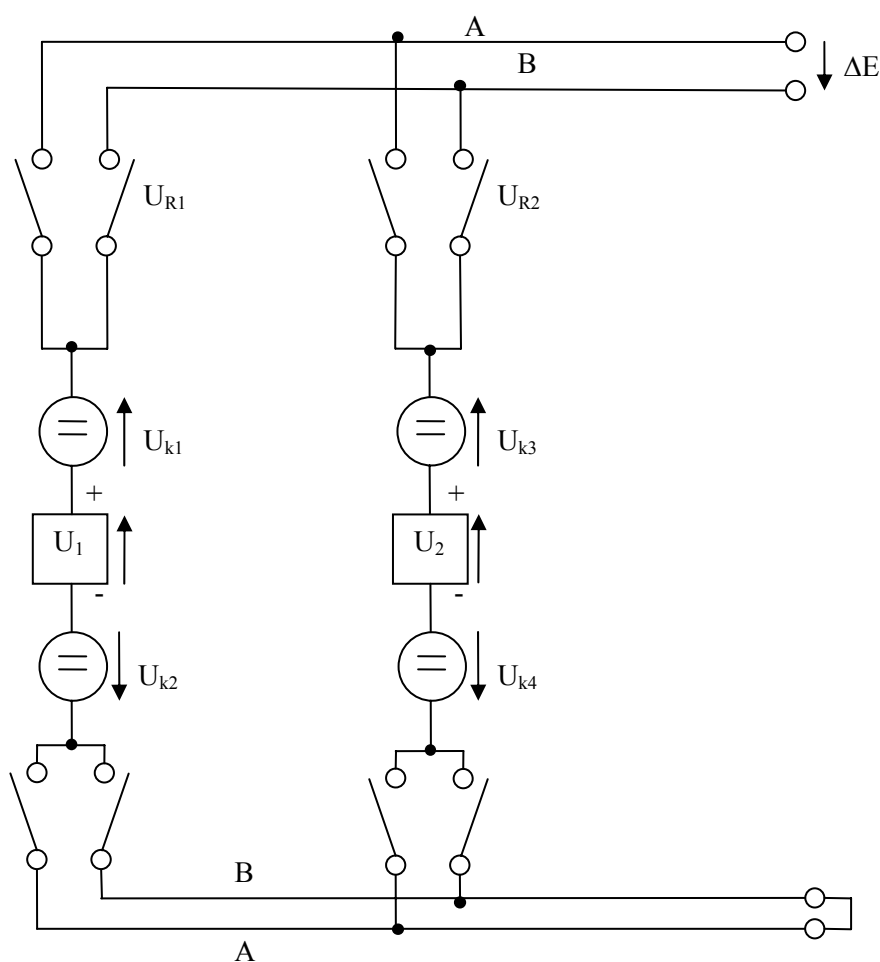


Obrázek 7: Schéma zapojení měření pro měření s Josephsonovým etalonem.

5 ROZBOR POROVNÁVÁNÍ ZENEROVÝCH REFERENCÍ

5.1 Popis systému 2 Zenerových referencí

Příklad výpočtu konstantního napětí $2P$ pro dva etalony stejnosměrného napětí, kde postupujeme podle popsané metody v kapitole 4.2.1 *Měření dvou etalonů stejnosměrného napětí*. Na obrázku 8 je uvedeno zapojení měření, kde jsou uvedeny chyby, které vznikají při měření. U_{R1} a U_{R2} jsou úbytky napětí na kanálu skeneru.



Obrázek 8: Schéma zapojení měření pro dva články.

Další chybou, která může vzniknout při měření, je termoelektrické napětí na přívodních kabelech U_k . Tyto kabely jsou vedeny vedle sebe a jsou na stejné diferenci teplot. Tedy předpokládám, že vzniklá termoelektrická napětí U_k se budou rovnat podle následujícího vzorce.

$$U_{k1} = U_{k2}, U_{k3} = U_{k4} \quad (5.1)$$

U_{k1}, U_{k2} - termoelektrické napětí na kabelech,

U_{k3}, U_{k4} - termoelektrické napětí na kabelech.

5.2 Výpočet napětí ΔE a $\Delta E'$

Princip měření je takový, že dva etalony spojené sériově změříme v obou směrech, kde získáme dvě rozdílová napětí ΔE a $\Delta E'$.

$$\begin{aligned} \Delta E &= -2 \cdot U_{R1} - U_{k1} + U_1 + U_{k2} - 2 \cdot U_{R2} \\ &- U_{k4} - U_2 + U_{k3} = -2 \cdot U_{R1} + U_1 - 2 \cdot U_{R2} - U_2 \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} \Delta E' &= -2 \cdot U_{R2} - U_{k3} + U_2 + U_{k4} - 2 \cdot U_{R1} \\ &- U_{k2} - U_1 + U_{k1} = -2 \cdot U_{R2} + U_2 - 2 \cdot U_{R1} - U_1 \end{aligned} \quad (5.3)$$

U_{RX} - úbytek napětí na kontaktech relé ve skeneru na daném kanálu

Nyní vypočítáme ze dvou naměřených napětí ΔE a $\Delta E'$ konstantní napětí $2P$, které dosadíme do vzorce (4.4).

$$\begin{aligned} \Delta E + \Delta E' &= 2 \cdot P \\ -2 \cdot U_{R1} + U_1 - 2 \cdot U_{R2} - U_2 - 2 \cdot U_{R2} + U_2 - 2 \cdot U_{R1} - U_1 &= 2 \cdot P \\ -4 \cdot U_{R1} - 4 \cdot U_{R2} &= 2 \cdot P \end{aligned} \quad (5.4)$$

5.2.1 Výpočet hodnot $2P$ pro 3 reference

Výpočet jednotlivých úbytků U_{RX} z naměřených hodnot $2P$ pro 3 reference.

$$2P_{12} = -4 \cdot U_{R1} - 4 \cdot U_{R2}$$

$$2P_{23} = -4 \cdot U_{R2} - 4 \cdot U_{R3}$$

$$2P_{13} = -4 \cdot U_{R1} - 4 \cdot U_{R3}$$

Nyní pro výpočet jednotlivých úbytků U_{RX} odečteme dvě hodnoty $2P$ s jedním stejným indexem. Tím vypočítáme P'_{xx} .

$$(2P_{12} - 2P_{23}) = -4 \cdot U_{R1} - 4 \cdot U_{R2} + 4 \cdot U_{R2} + 4 \cdot U_{R3} \quad (5.5)$$

$$P'_{13} = -4 \cdot U_{R1} + 4 \cdot U_{R3}$$

$$(2P_{12} - 2P_{13}) = -4 \cdot U_{R1} - 4 \cdot U_{R2} + 4 \cdot U_{R1} + 4 \cdot U_{R3}$$

$$P'_{23} = -4 \cdot U_{R2} + 4 \cdot U_{R3}$$

$$(2P_{23} - 2P_{13}) = -4 \cdot U_{R2} - 4 \cdot U_{R3} + 4 \cdot U_{R1} + 4 \cdot U_{R3}$$

$$P_{21} = -4 \cdot U_{R2} + 4 \cdot U_{R1}$$

Nyní z jednotlivých P'_{xx} a $2P_{xx}$ vypočítáme konkrétní úbytky U_{RX} jednotlivých kanálů skeneru.

$$P_1^{13} = P_{13} + 2P_{13} = -4 \cdot U_{R1} + 4 \cdot U_{R3} - 4 \cdot U_{R1} - 4 \cdot U_{R3} = -8 \cdot U_{R1} \quad (5.6)$$

$$P_2^{23} = P_{23} + 2P_{23} = -4 \cdot U_{R2} + 4 \cdot U_{R3} - 4 \cdot U_{R2} - 4 \cdot U_{R3} = -8 \cdot U_{R2}$$

$$P_2^{12} = P_{21} + 2P_{12} = -4 \cdot U_{R2} + 4 \cdot U_{R1} - 4 \cdot U_{R1} - 4 \cdot U_{R2} = -8 \cdot U_{R2}$$

$$P_3^{13} = 2P_{13} - P_{13} = -4 \cdot U_{R1} - 4 \cdot U_{R3} + 4 \cdot U_{R1} - 4 \cdot U_{R3} = -8 \cdot U_{R3}$$

$$P_3^{23} = 2P_{23} - P_{23} = -4 \cdot U_{R2} - 4 \cdot U_{R3} + 4 \cdot U_{R2} - 4 \cdot U_{R3} = -8 \cdot U_{R3}$$

$$P_1^{12} = 2P_{12} - P_{21} = -4 \cdot U_{R1} - 4 \cdot U_{R2} + 4 \cdot U_{R2} - 4 \cdot U_{R1} = -8 \cdot U_{R1}$$

Jednotlivé úbytky U_{RX} na kanálech jsou označeny P_x^{yy} kde x je číslo kanálu a yy z jakých vstupních hodnot je úbytek spočítán. Pro kontrolu jednotlivých U_{RX} se udělá doplňkový výpočet z jiných vstupních hodnot. Tím je možno ověřit pravost jednotlivých měření.

5.2.2 Výpočet hodnot 2P pro 4 reference

Výpočet jednotlivých úbytků U_{RX} na skeneru pro 4 reference. Využije se zde rovnic jako pro tři reference plus kombinace se čtvrtou referencí.

$$2P_{41} = -4 \cdot U_{R4} - 4 \cdot U_{R1} \quad (5.7)$$

$$2P_{42} = -4 \cdot U_{R4} - 4 \cdot U_{R2}$$

$$2P_{43} = -4 \cdot U_{R4} - 4 \cdot U_{R3}$$

$$(2P_{12} - 2P_{41}) = -4 \cdot U_{R1} - 4 \cdot U_{R2} + 4 \cdot U_{R4} + 4 \cdot U_{R1} \quad (5.8)$$

$$P_{24} = -4 \cdot U_{R2} + 4 \cdot U_{R4}$$

$$(2P_{23} - 2P_{42}) = -4 \cdot U_{R2} - 4 \cdot U_{R3} + 4 \cdot U_{R4} + 4 \cdot U_{R2}$$

$$P_{34} = -4 \cdot U_{R3} + 4 \cdot U_{R4}$$

$$(2P_{23} - 2P_{43}) = -4 \cdot U_{R2} - 4 \cdot U_{R3} + 4 \cdot U_{R4} + 4 \cdot U_{R3}$$

$$P_{24} = -4 \cdot U_{R2} + 4 \cdot U_{R4}$$

$$(2P_{13} - 2P_{41}) = -4 \cdot U_{R1} - 4 \cdot U_{R3} + 4 \cdot U_{R4} + 4 \cdot U_{R1}$$

$$P_{34} = -4 \cdot U_{R3} + 4 \cdot U_{R4}$$

$$(2P_{12} - 2P_{42}) = -4 \cdot U_{R1} - 4 \cdot U_{R2} + 4 \cdot U_{R4} + 4 \cdot U_{R2}$$

$$P_{14} = -4 \cdot U_{R1} + 4 \cdot U_{R4}$$

$$(2P_{13} - 2P_{43}) = -4 \cdot U_{R1} - 4 \cdot U_{R3} + 4 \cdot U_{R4} + 4 \cdot U_{R3}$$

$$P_{14}'' = -4 \cdot U_{R1} + 4 \cdot U_{R4}$$

Nyní postupujeme jako u třech referencí. Ale počítáme jen s hodnotami, kde se nám projeví čtvrtá reference.

$$P_1^{14} = P_{14}' + 2P_{14} = -4 \cdot U_{R1} + 4 \cdot U_{R4} - 4 \cdot U_{R1} - 4 \cdot U_{R4} = -8 \cdot U_{R1} \quad (5.9)$$

$$P_2^{24} = P_{24}' + 2P_{24} = -4 \cdot U_{R2} + 4 \cdot U_{R4} - 4 \cdot U_{R2} - 4 \cdot U_{R4} = -8 \cdot U_{R2}$$

$$P_3^{34} = P_{34}' + 2P_{34} = -4 \cdot U_{R3} + 4 \cdot U_{R4} - 4 \cdot U_{R3} - 4 \cdot U_{R4} = -8 \cdot U_{R3}$$

$$P_4^{14} = 2P_{14} - P_{14}' = -4 \cdot U_{R1} - 4 \cdot U_{R4} + 4 \cdot U_{R1} - 4 \cdot U_{R4} = -8 \cdot U_{R4}$$

$$P_4^{24} = 2P_{24} - P_{24}' = -4 \cdot U_{R2} - 4 \cdot U_{R4} + 4 \cdot U_{R2} - 4 \cdot U_{R4} = -8 \cdot U_{R4}$$

$$P_4^{34} = 2P_{34} - P_{34}' = -4 \cdot U_{R3} - 4 \cdot U_{R4} + 4 \cdot U_{R3} - 4 \cdot U_{R4} = -8 \cdot U_{R4}$$

Nejsou zde spočítány všechny kombinace, které mohou nastat, protože s přírůstkem referencí značně stoupá počet kombinací, ze kterých se dají jednotlivé úbytky na skeneru vypočítat. Uvádím výpočet ze třech různých hodnot, což podle mého uvážení stačí pro kontrolu správnosti jednotlivých výsledků.

6 NEJISTOTY V POROVNÁVÁNÍ ZENEROVÝCH REFERENCÍ

Nejistota měření je parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje míru nejistoty správnosti hodnot, které by mohly být důvodně přisuzovány k měřené veličině. Jedná se tedy o určitý interval kolem správné hodnoty měřené veličiny. [8], [10]

Zdroje nejistot jsou takové jevy v průběhu měření, které ovlivňují neurčitost stanovení výsledku daného měření. Znalost zdrojů je jeden ze základních faktorů pro správné určení nejistot, je potřebné důkladně prozkoumat, jaké zdroje nejistot se mohou u daného měření objevit.

Nejistoty se skládají z několika jednotlivých nejistot neboli složek nejistot. Složky nejistot se rozdělují na:

- Nejistota typu A $u_A(x)$ – určuje se pomocí statistických metod aplikovaných na sériích pozorování.
- Nejistota typu B $u_B(x)$ – určuje se z jiné odborné znalosti týkající se vstupní veličiny bez využití statistických metod.

6.1 Rozbor chyb měření

Vlastní konstrukce měřicího přístroje způsobuje několik typů chyb. Při měření malých napětí je jednou z nejdůležitějších chyb *offset* měřicího přístroje, kdy je při nulovém vstupním napětí indikována určitá měřená hodnota.

V připojovacích vodičích při měření malých napětí vznikají další chyby, které způsobují značné potíže kvůli elektromagnetickým polím. Proto by měly být použity stíněné koaxiální kabely anebo kroucené dvojvodiče na minimalizaci elektromagnetických vlivů.

Také termoelektrická interference je jednou z nejčastějších zdrojů chyb při měření. Vzniká rozdílnou teplotou v různých částech obvodu, a když jsou spojeny vodiče různých materiálů, tj. materiálů s různými teplotními koeficienty. Tento jev se dá minimalizovat nejjednodušeji použitím stejných materiálů vodičů v obvodu. Z běžně používaných spojů je nejméně tepelně závislý spoj Cu-Cu ($0,2\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) a nejvíce závislý je spoj Cu-CuO ($1\text{mV}/^\circ\text{C}$). Dalšími možnostmi, jak minimalizovat termoelektrický vliv, je minimalizovat teplotní gradient, anebo dovolit obvodu dosáhnout tepelné rovnováhy.

I impedance elektrických přívodů může způsobit taky značné poklesy napětí mezi zdrojem a zátěží, hlavně když jsou přívody dlouhé a protéká nimi velký proud. Impedanci elektrických přívodů minimalizujeme použitím nízkoztrátových vedení.

Když vedeme víc přívodů v rámci jedné izolace, neměly by být mezi nimi velké napěťové rozdíly.

Také svodový proud může způsobit významné chyby a nepřesnosti v měření, hlavně při vysokých napětích. Různé materiály izolace způsobují různé ztráty. Svodový proud omezíme výběrem vhodného materiálu pro izolaci a kvalitním pokrytím přívodů izolací.

6.2 Nejistoty typu A

Standardní nejistota typu A $u_A(\bar{x})$ je založena na statické analýze opakované série měření, čímž se popisují náhodné chyby. Při dostatečné počtu n prováděného měření, je odhad výsledné hodnoty reprezentován hodnotou výběrového aritmetického průměru \bar{x} , který se vypočítá pomocí vzorce (6.1). Příslušná nejistota $u_A(\bar{x})$ k odhadu se určí jako směrodatná odchylka výběrového průměru, která se vypočítá pomocí vzorce (6.2). [8], [10]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{kde,} \quad (6.1)$$

\bar{x} - aritmetický průměr naměřených hodnot,

n - počet naměřených hodnot,

x_i - jednotlivé naměřené hodnoty.

$$u_A(\bar{x}) = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{s^2(x_i)}{n}} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{kde,} \quad (6.2)$$

$u_A(\bar{x})$ - standardní nejistota typu A,

$s^2(x_i)$ - výběrový rozptyl,

n - počet naměřených hodnot,

x_i - naměřené hodnoty,

\bar{x} - aritmetický průměr naměřených hodnot.

6.3 Nejistota typu B

Na jiném přístupu je založena standardní nejistota typu B, která je způsobena známými nebo odhadnutelnými příčinami. Stanoví postupy, které nejsou přímo definovány ve standardu. Příčin vzniku standardních nejistot hodnocených způsobem B může být více a výsledná standardní nejistota u_B je dána jejich geometrickým součtem. [8], [10]

6.4 Kombinovaná nejistota

Obvykle je třeba vyjádřit nejistotu jedním číslem. K tomu se používá standardní kombinovaná $u_c(\bar{x})$ nejistota, která se skládá ze složek nejistot $u_A(\bar{x})$ a $u_B(\bar{x})$. Tato nejistota se vypočítá podle následujícího vzorce.[8], [10]

$$u_c(\bar{x}) = \sqrt{u_A^2(\bar{x}) + u_B^2(\bar{x})} \text{ kde,} \quad (6.3)$$

$u_c(\bar{x})$ - standardní kombinovaná nejistota,

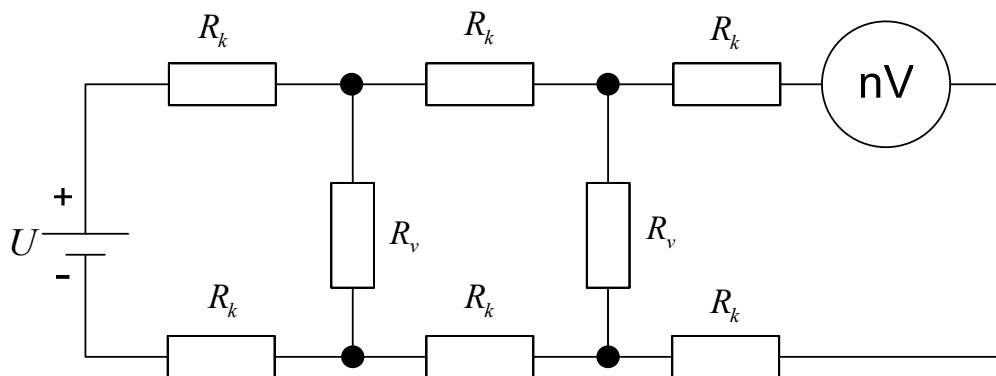
$u_A(\bar{x})$ - standardní nejistota typu A,

$u_B(\bar{x})$ - standardní nejistota typu B.

6.5 Úbytek napětí na přívodním kabelu

Dále se na chybě při měření podílí svodový odpor R_v a odpor přívodních kabelů R_k .

Na obrázku 9 je vidět náhradní schéma přívodního kabelu, kde se projevuje jak svodový odpor R_v tak odpor kabelu R_k , který je připojen na nanovoltmetru Keithley. V následujících kapitolách jsou vyjádřeny jednotlivé hodnoty jak svodového odporu R_v , tak odporu kabelu R_k .



Obrázek 9: Náhradní schéma přívodního kabelu.

6.5.1 Svodový odpor

Svodový odpor R_v jsem vypočítal z parametrů kabelu a jeho izolace. Tyto parametry jsou tloušťka izolace $h = 0.06$ cm, plocha dotyku $S = 4.6$ cm² která je odvozená od délky kabelu (předpoklad 2m) a šířky dotyku kabelů a objemová rezistivita $\rho_v = 1 \cdot 10^{18}$ $\Omega \cdot \text{cm}$ pro použitou izolaci teflon. Po dosazení těchto konkrétních hodnot do

vzorce (6.4) se vypočítá svodový odpor R_v , který má hodnotu $R_v = 1.3 \cdot 10^{16} \Omega = 1.3 \cdot 10^7 \text{G}\Omega$.

$$\rho_v = R_v \frac{S}{h} \quad \text{kde,} \quad (6.4)$$

$$R_v = \rho_v \frac{h}{S}$$

R_v - svodový odpor [Ω],

h - tloušťka izolace, $h = 0.06 \text{ cm}$,

S - plocha dotyku, $S = 4.6 \text{ cm}^2$,

ρ_v - objemová rezistivita, $\rho_v = 1 \cdot 10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$.

6.5.2 Vlastní odpor kabelu

Při měření vzniká také další chyba způsobená nenulovým odporem přívodních kabelů R_k , na kterých vzniká napěťový úbytek.

Tento odpor R_k jsem spočítal na základě parametrů kabelu, kterými jsou průměr kabelu $d=0,5\text{mm}$, délky vodiče $l=2\text{m}$, průřez vodiče $S=1.96 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ a měrný odpor $\rho_k = 1.69 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ pro materiál měď. Odpor přívodních kabelů R_k se spočítá dosazením konkrétních hodnot kabelu do vzorce (6.6) a má hodnotu $R_k = 0.172 \Omega$.

$$R_k = \rho_k \frac{l}{S} \quad \text{kde,} \quad (6.6)$$

R_k - odpor přívodních kabelů [Ω],

l - délka kabelu, $l = 2 \text{ m}$,

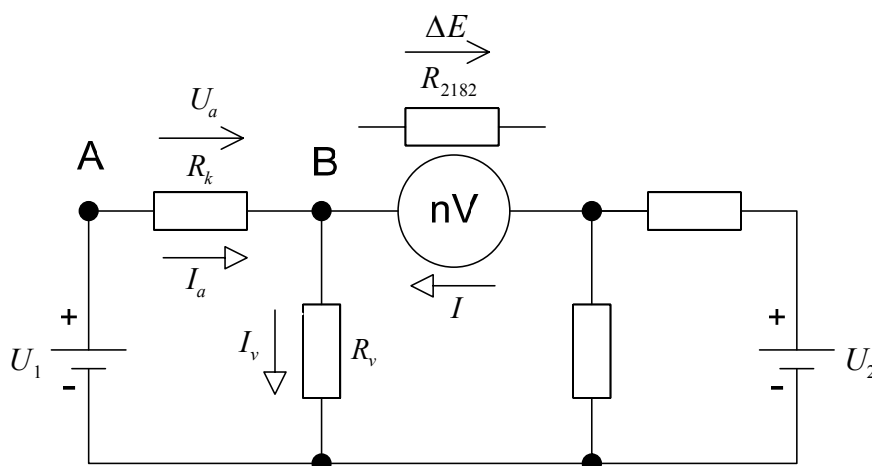
S - průřez kabelu, $S = 1.96 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$,

ρ_k - měrný odpor, $\rho_k = 1.69 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$.

6.5.3 Úbytek napětí

Z výše vypočtených parametrů kabelu jsem vypočítal celkový úbytek U_a na přívodním kabelu.

Úbytek U_a je vypočítán pro napěťový rozdíl ΔE mezi Zenerovými referencemi měřený nanovoltmetrem Keithley 2182, jehož vstupní odpor R_{2182} je udán v technické dokumentaci a má hodnotu $R_{2182} = 10 \cdot 10^9 \Omega$. Pro výpočet úbytku napětí U_a na kabelu jsem použil metodu uzlových napětí, viz Obrázek 10.



Obrázek 10: Úbytek napětí U_a na přívodním kabelu, náhradní schéma.

Označil jsem si uzly A a B (uzel A jako referenční) a napětí mezi nimi U_a . Nanovoltmetr Keithley 2182 pak měří napětí Zenerových referencí ΔE a pro velikost tohoto napětí $\Delta E = 1 \text{ mV}$ je vypočítán obecně úbytek napětí na kabelu U_a podle rovnic (6.7), (6.8), (6.9) :

$$I_a + I - I_v = 0 \quad (6.7)$$

$$\frac{U_a}{R_k} + \frac{\Delta E}{R_{2182}} - \frac{U_1 - U_a}{R_v} = 0 \quad (6.8)$$

$$U_a = \frac{R_k \cdot R_{2182} \cdot U_1 + R_k \cdot R_v \cdot \Delta E}{R_k \cdot R_{2182} + R_{2182} \cdot R_v} \quad (6.9)$$

Dosazením konkrétních hodnot $R_k = 0.345 \, \Omega$, $R_v = 1.3 \cdot 10^{16} \, \Omega$, $\Delta E = 1 \cdot 10^{-3} \text{ V}$, $R_{2182} = 10 \cdot 10^9 \, \Omega$ do výše uvedených vztahů a při napětí $U_1 = 10 \text{ V}$ se obdrží velikost úbytku napětí $U_a = 3.4765 \cdot 10^{-5} \text{ nV}$

6.6 Základní chyba Keithley 2182

Jeden ze zdrojů nejistot měření Zenerových referencí typu B $u_{B1}(\Delta E)$ je základní chyba Δ_{2182} samotného nanovoltmetru Keithley 2182 pro daný měřicí rozsah.

V technické dokumentaci udává výrobce Keithley parametry související s přesností přístroje, viz tabulka. Při měření Zenerových referencí ΔE byl využíván kanál č. 1 nanovoltmetru Keithley 2182.

Rozsah	Rozlišitelnost	Vstupní odpor	Přesnost ±(ppm z odečtu + ppm z rozsahu)
10.000000 mV	1 nV	>10 GΩ	20 + 4

10 ppm = 0.001%.

Základní chyba nanovoltmetru Keithley 2182 Δ_{2182} pro měřicí rozsah X_R 10 mV a měřené hodnoty X_M 1 mV má hodnotu po dosazení do obecného vztahu:

$$\Delta_{2182} = \frac{|\delta_M \cdot X_M| + |\delta_R \cdot X_R|}{100} = \frac{|20 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 10^{-3}| + |4 \cdot 10^{-4} \cdot 10 \cdot 10^{-3}|}{100} = 60 nV \quad (6.10)$$

$$u_{B1}(\Delta E) = \frac{\Delta_{2681}}{\sqrt{3}} = \frac{60 \cdot 10^{-9}}{\sqrt{3}} = 34.64 nV \quad (6.11)$$

Standardní nejistota typu B $u_{B1}(\Delta E)$ je 34.64 nV.

6.7 Celková nejistota při měření

Kombinovaná nejistota měření Zenerových referencí $u_C(\Delta E)$ se tedy skládá ze:

- standardní nejistoty typu B $u_{B1}(\Delta E)$, jejímž zdrojem nanovoltmetr Keithley2182, a

kteřá se vypočítá z hodnoty základní chyby Δ_{2182} , $u_{B1}(\Delta E) = \frac{\Delta_{2681}}{\sqrt{3}} = 34.64 nV$,

- standardní nejistoty typu B $u_{B2}(\Delta E) = 3.47 \cdot 10^{-5} nV$, která je způsobena úbytkem napětím U_a .
- standardní nejistoty typu A $u_A(\Delta E)$ měření Zenerových referencí, $u_A(\Delta E) = 8.81 nV$.

Předchozí dvě standardní nejistoty typu B $u_{B1}(\Delta E)$, $u_{B2}(\Delta E)$ jsou vyčísleny výše, z nichž standardní nejistota typu B přírodního kabelu $u_{B2}(\Delta E)$ je nevýznamná. Nejistota typu B $u_{B1}(\Delta E)$, jejímž zdrojem je nanovoltmetr Keithley2182 není už zanedbatelná.

Třetí složkou kombinované nejistoty $u_C(\Delta E)$ je standardní nejistota typu A $u_A(\Delta E)$, která je založena na statistické analýze opakovaných měření. Vyčíslením standardní nejistoty měření Zenerových retencí $u_A(\Delta E)$ pro každý kanál skeneru se zabývám v kapitole 5. *Rozbor porovnávání Zenerových referencí*. V kapitole 8. *Měření ZRS* jsem se tuto standardní nejistotu $u_A(\Delta E)$ snažil vyčíslit pomocí naměřených hodnot ZRS.

Celková nejistota při měření offsetů na kanálu skeneru je uvedena pro druhý kanál. Nejistota $u_A(\Delta E)$ pro druhý kanál je 8.81 nV.

Ze všech výše zmíněných složek (úbytek na přívodním kabelu $u_{B2}(\Delta E)$, chyba nanovoltmetru $u_{B1}(\Delta E)$, standardní nejistota $u_A(\Delta E)$ kanálu skeneru) je vypočítána standardní kombinovaná nejistota $u_C(\Delta E)$ podle vzorce (6.3).

$$u_C(\Delta E) = \sqrt{u_A^2(\Delta E) + u_{B1}^2(\Delta E) + u_{B2}^2(\Delta E)} = \sqrt{8.81^2 + 34.64^2 + (3,4765 \cdot 10^{-5})^2} \quad (6.12)$$

$$u_C(\Delta E) = 35,74 \text{ nV}$$

7 PROGRAM PRO MĚŘENÍ A VÝPOČET ZSR

Programová část této práce se skládá ze dvou etap. První etapa je měření pomocí programu LabView a druhá etapa je výpočet dat z naměřených hodnot pomocí programu Matlab. Tyto části programu jsou podrobněji probrány níže. Tyto programy byly vybrány pro jejich dostupnost na ČMI a také jejich jednoduchost při řešení daného úkolu.

7.1 Měření ZRS v LabView

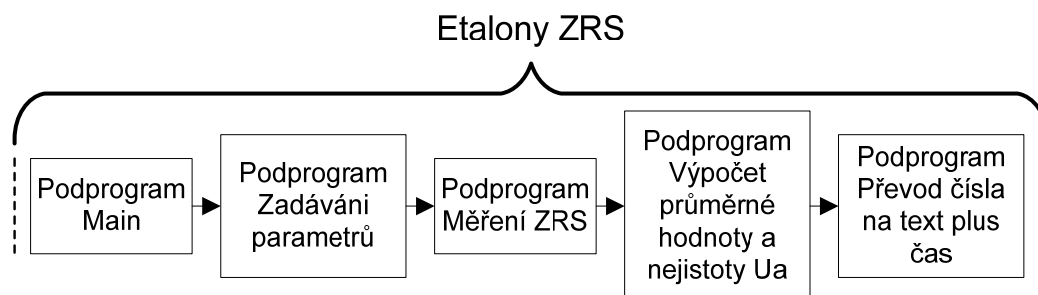
LabView je vývojové prostředí pro vytváření virtuálních aplikací, které jsou zaměřeny na měření, sběr, zpracování a prezentaci naměřených dat. Tento programovací jazyk je v grafické podobě a obsahuje všechny potřebné funkce. Tento jazyk se nazývá G (Graphical language). Výsledný produkt vytvořen v tomto jazyce se nazývá virtuálním přístrojem (Virtual Instruments VI).

Uživatelské prostředí tvoří panel obsahující ovládací a indikační prvky. Tento panel se nazývá Front Panel a obsahuje prvky na ovládání aplikace (tlačítka, indikátory, atd.). Tyto navržené komponenty jsou dále propojovány a upraveny v tzv. Blok Diagramu, kde se jim připojují další funkce (matematické funkce atd.), které zpracovávají naměřená data. Blokový diagram je zdrojovou podobou každé aplikace.

Aplikace má hierarchickou a modulární strukturu. Program lze používat jako celek nebo pouze jeho části - podprogramy (podVI, subVI). Z toho vyplývá, že vývojové prostředí můžeme řadit mezi modulární programování. Na závěr lze celou aplikaci přeložit do *.exe tvaru a provozovat nezávisle na vývojovém prostředí. [9]

Program *Etalony ZRS*

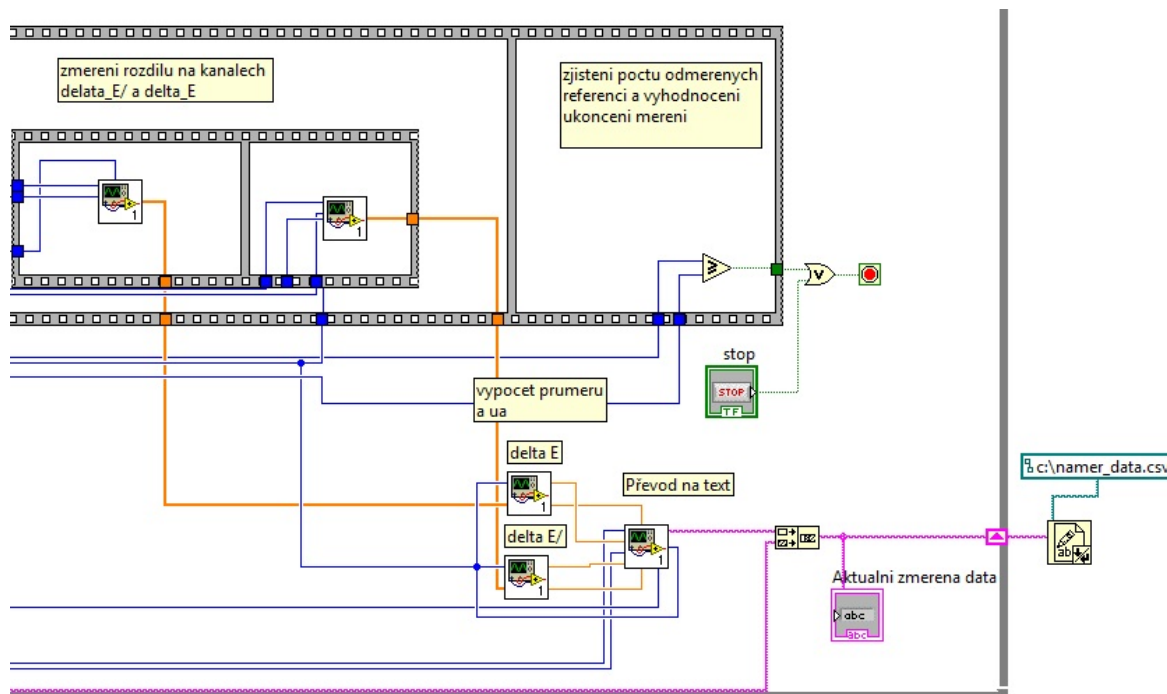
Program *Etalony ZRS* je vytvořen jako projekt, který se dále skládá s více podprogramů subVI. Každý z pěti podprogramů realizuje jiný úkol. První a hlavní takový podprogram, kterým se spouští celý projekt, se jmenuje „Main“. V něm se volají ostatní podprogramy.



Obrázek 11: Blokové schéma programu *Etalony ZRS*.

Podprogram *Main*

Programem *Main* se spouští celé měření. Volají se zde všechny výše popsané podprogramy, které se provádějí v postupném harmonogramu. Jako první se zavolá podprogram *Zadávání parametrů a výpočet matice reference*.



Obrázek 12: Podprogram *Main*.

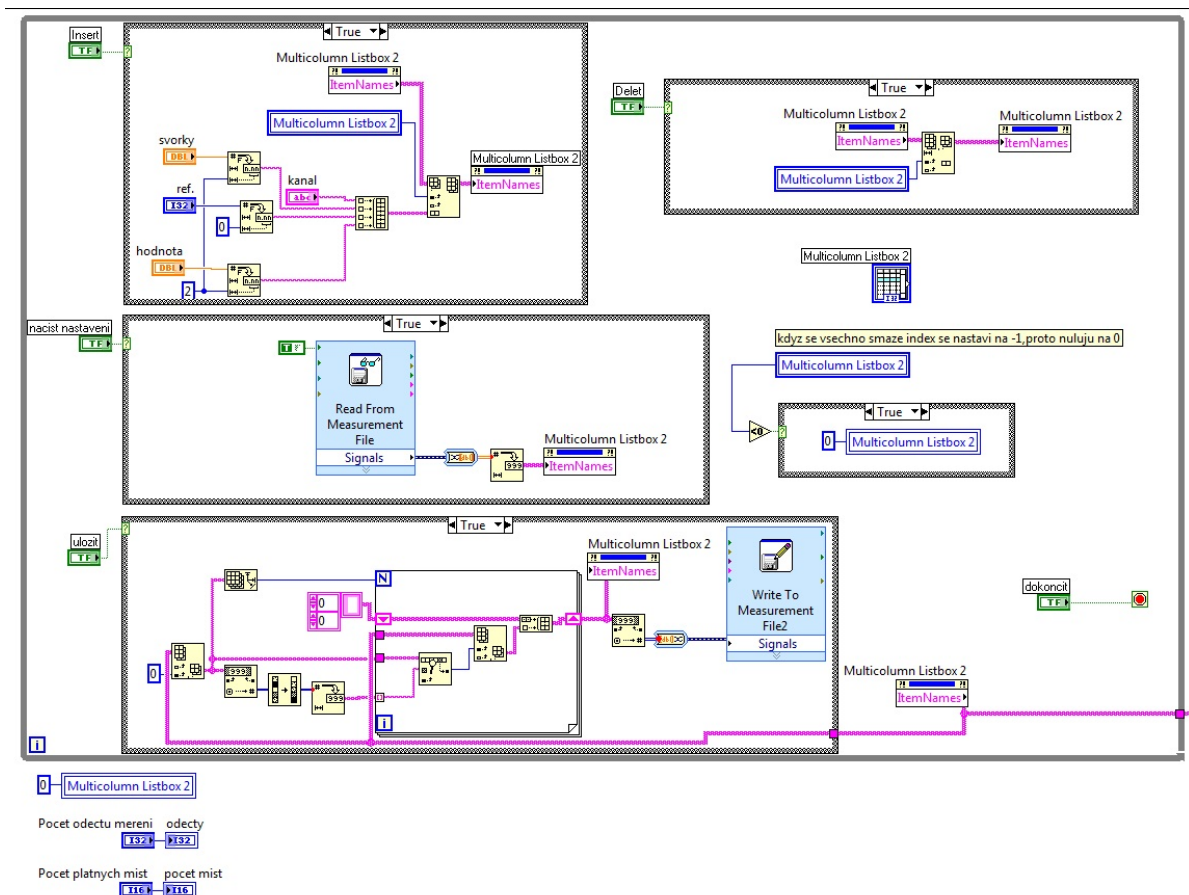
Podprogram *Zadávání parametrů a výpočet matice reference*

V bločku zadávání referencí a parametrů se provádí zadávání referencí. Tento podprogram je spuštěn jako první. Skládá se ze dvou částí - zadávání parametrů a výpočet matice referencí ze zadaných hodnot kanálů. Tomuto podprogramu odpovídají druhý blok blokového schématu na obrázku 11.

V první části se provádí zadávání parametrů pro samotné měření. Toto se skládá z části pro zadávání připojených referencí a parametrů měření. To se provádí pomocí řádku pro zadávání hodnot jako číslo kanálu na skeneru, na který je daná reference připojena. Dále hodnotu dané reference, číslo reference. Potvrzení provedeme tlačítkem „insert“, kterým se hodnoty vloží do tabulky zadaných hodnot. Takto se může pokračovat v zadávání podle potřeb a zapojených referencí ke skeneru. Pro usnadnění se použije tlačítko „Nacist nastavení“, pokud již máme vytvořenou konfiguraci. Při případných změnách se nastavení může uložit. Po dokončení zadávání se potvrdí tlačítkem „Dokončit“, kterým se bude dále pokračovat v programu. Toto znázorňuje obrázek 13. Kód pro tuto část programu je vidět na obrázku 14.

[illegible]

Obrázek 13: Zadávání parametrů ZSR



Obrázek 14: Podprogram Zadávání parametrů ZSR.

V druhé části tohoto podprogramu se provádí výpočet matice referencí ze zadaných kombinací referencí (čísla kanálů), tak aby byl změřen každý kanál s každým. Nejdříve se z počtu n zadaných referencí vypočítá, kolik může nastat kombinací ck dvou kanálů bez opakování, tato hodnota se vypočte podle následujícího vzorce.

$$ck = \frac{n!}{k!(n-k)!} \quad (7.1)$$

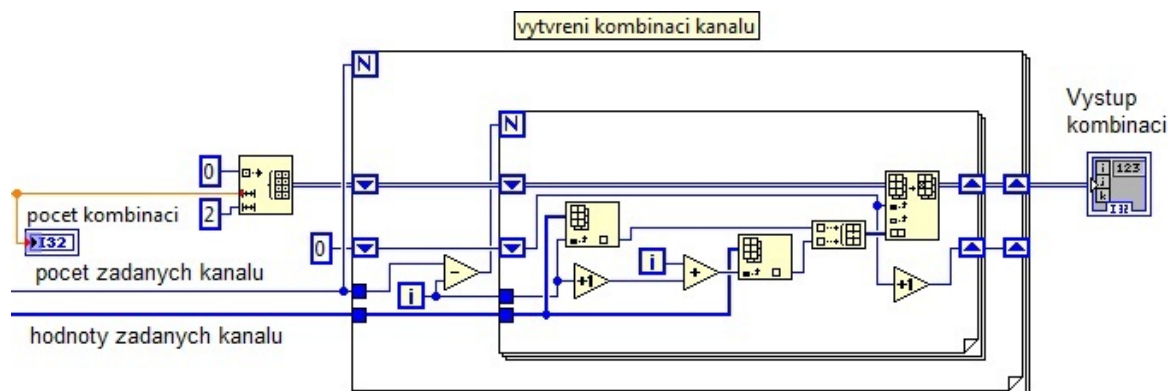
ck -počet kombinací kanálů referencí,

n - počet zadaných kanálů,

k - skupina prvků vybraných z celkového počtu n prvků.

Pro náš případ bude hodnota k stále 2, protože se provádí kombinace dvou kanálů.

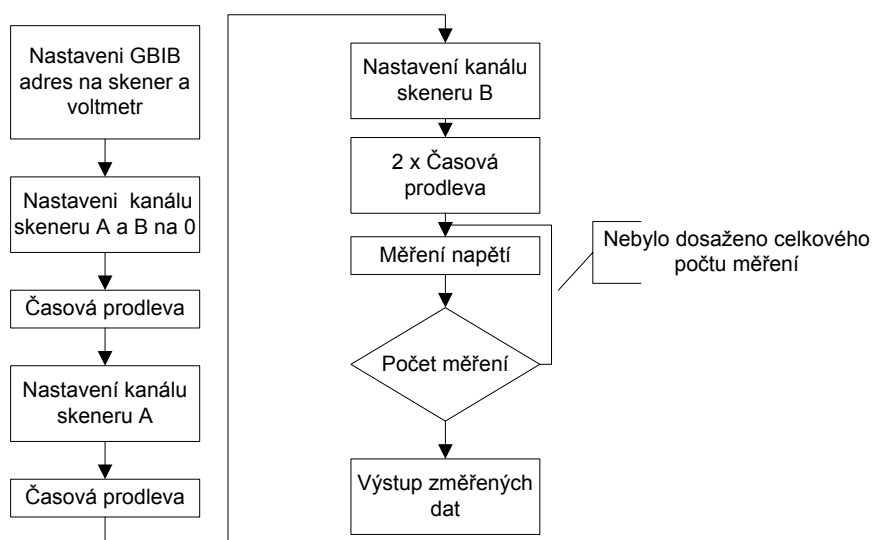
Pomocí následujícího algoritmu ze zadaných kanálů se vypočítá matice s kombinacemi kanálů. Algoritmus je zobrazen na obrázku 15.



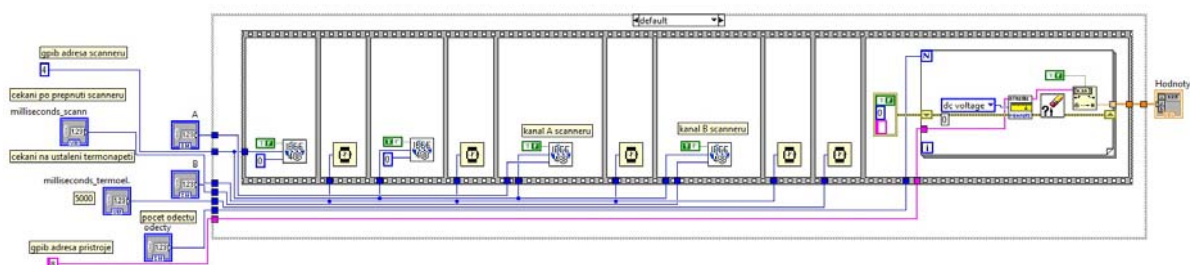
Obrázek 15: Ukázka vytvoření matice kombinací kanálů.

Podprogram *Měření ZSR*

V podprogramu *Měření ZSR* se provádí samotné měření hodnot včetně přepínání kanálů na skeneru a poté měření pomocí nanovoltmetru. Na obrázku 16 je znázorněn postup při měření. Kanály na skeneru se musí nastavovat postupně a je mezi nimi časová prodleva, aby bylo zajištěno, že se skener stihl přepnout. Před samotným změřením je tato časová prodleva zdvojnásobena kvůli ustálení termoelektrického napětí, které by mohlo vzniknout. Na obrázku 17 je vidět daný podprogram.



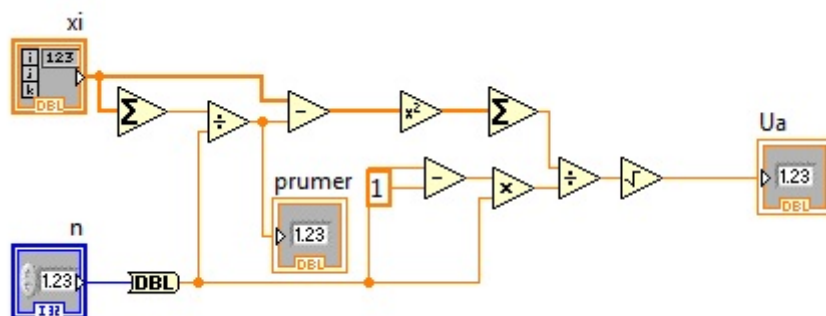
Obrázek 16: Postup při měření ZSR.



Obrázek 17: Podprogram *Měření ZSR*.

Podprogram *Výpočet průměrné hodnoty a nejistoty U_a*

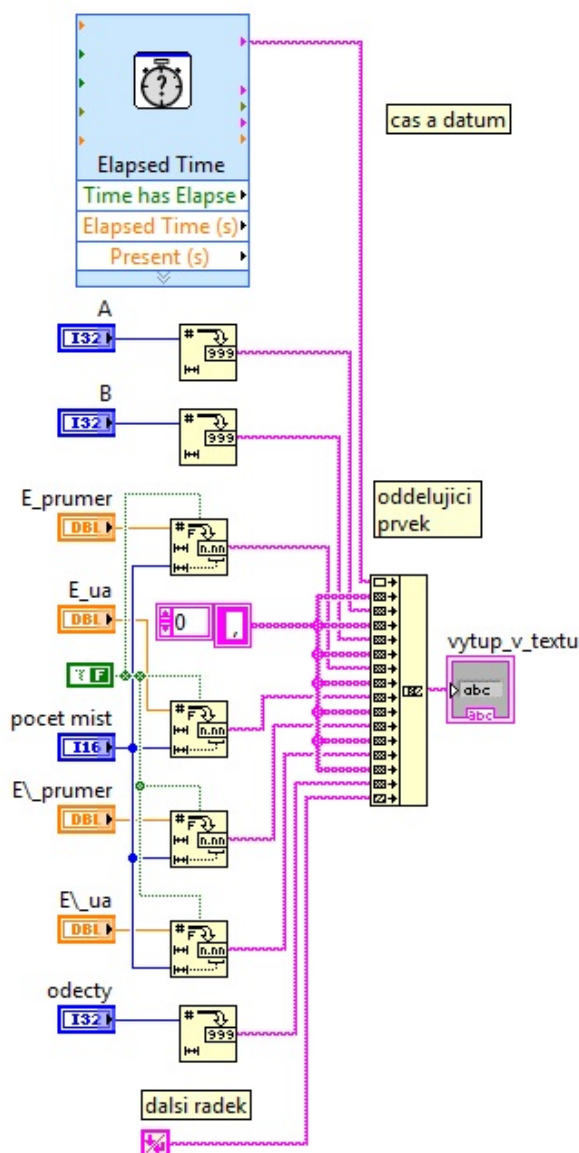
V podprogramu *Výpočet průměrné hodnoty a nejistoty U_a* se vypočítá průměrná hodnota podle vzorce (6.1), který se uloží do proměnné *prumer* pro další použití. Dále je zde spočítána nejistota u_A podle vzorce (6.2), která se uloží do proměnné U_a , kde n je počet změřených prvků a x_i jsou změřená data.



Obrázek 18: Podprogram *Výpočet průměrné hodnoty a nejistoty u_A*

Podprogram *Převod čísla na text plus čas*

V tomto podprogramu se převedou změřené i zadané hodnoty na text kvůli uložení hodnot do souboru. Také se zde přidává datum a čas, kdy bylo změřeno napětí mezi kanály A a B. Ze všech těchto údajů se vytvoří jeden řádek ve výstupním souboru. Postup provádění programu je vidět na obrázku 19.



Obrázek 19: Podprogram Převod čísla na text plus čas.

7.2 Zpracování dat v prostředí Matlab

Matlab je maticově orientovaný software. Základním objektem je matice a veškeré maticové operace jsou systémem podporovány.

Potřebná data jsou naměřená v LabView a následně se zpracovávají v sestaveném skriptu *Offsety kanálů skeneru* v prostředí Matlab.

Skript *Offsety kanálů skeneru*

Programové algoritmy v tomto skriptu realizují výpočet offsetu jednotlivých kanálů skeneru a jsou sestaveny podle teoretického návrhu v kapitole 5.2 *Výpočet napětí ΔE a $\Delta E'$* .

První krokem je výpočet velikosti parazitního napětí $2P$ podle vzorce (4.4) a to z naměřených hodnot rozdílových napětí ΔE a $\Delta E'$ pro ZRS. Tyto hodnoty se uloží do proměnné $p2$. Jedná se o dvoudimenzionální matici, kde indexy řádku a sloupce odpovídají kanálům skeneru, pro které byla hodnota změřena.

Z vypočtených hodnot $2P$ se dále vypočítá hodnota P'_{xx} podle vzorce (5.5). Tyto hodnoty se uloží do třídimeznionální matice p_{xx} , kde řádky a sloupce jsou čísla kanálu skeneru a velikost třetí dimenze je počet doplňkových výpočtů.

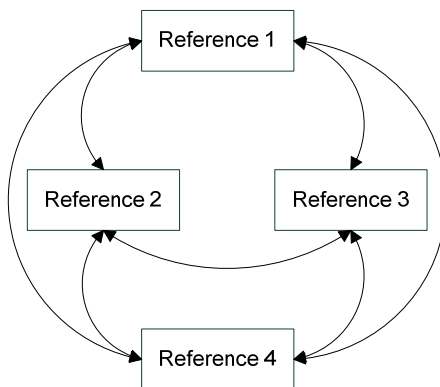
Nyní se z jednotlivých P'_{xx} a $2P_{xx}$ vypočítají konkrétní offsety U_{RX} jednotlivých kanálů skeneru a tyto hodnoty se uloží do proměnné p_{yy} , která je spočítána podle vzorce (5.6). Tato proměnná je čtyřdimenzionální, první dvě dimenze jsou kanály, z kterých jsou hodnoty vypočteny. Třetí dimenze je číslo kanálu, pro který je offset vypočítán. Čtvrtá dimenze udává počet hodnot vypočtených offsetů.

Ze získaných hodnot se vypočítá průměrná hodnota pro každý kanál skeneru a k nim příslušná nejistota u_A .

Konečné výsledky jsou zobrazeny po ukončení výpočtu.

Výpočet hodnot ZRS

Z naměřených hodnot rozdílových napětí ΔE a $\Delta E'$ se dále vypočítá hodnota měřených ZRS. Z blokového diagramu na obrázku 20 je vidět princip měření ZRS, kde každá reference se měří s každou. S počtem referencí roste počet kombinací měření podle vzorce (7.1).



Obrázek 20: Blokový diagram měření ZRS.

Z tohoto principu je vidět, že pokud je známa hodnota jedné reference, ostatní se dají dopočítat. Tato hodnota se zjistí při měření s JVS. Potom se tato hodnota reference bude brát jako absolutní hodnota. Pomocí této hodnoty se dopočítají ostatní reference.

Existuje i další možnost pro kontrolu vypočítat hodnotu referencí jiným způsobem. Nepoužije se absolutní hodnota reference odvozená od JVS, ale od referencí, které již jsou odvozeny od absolutní hodnoty reference.

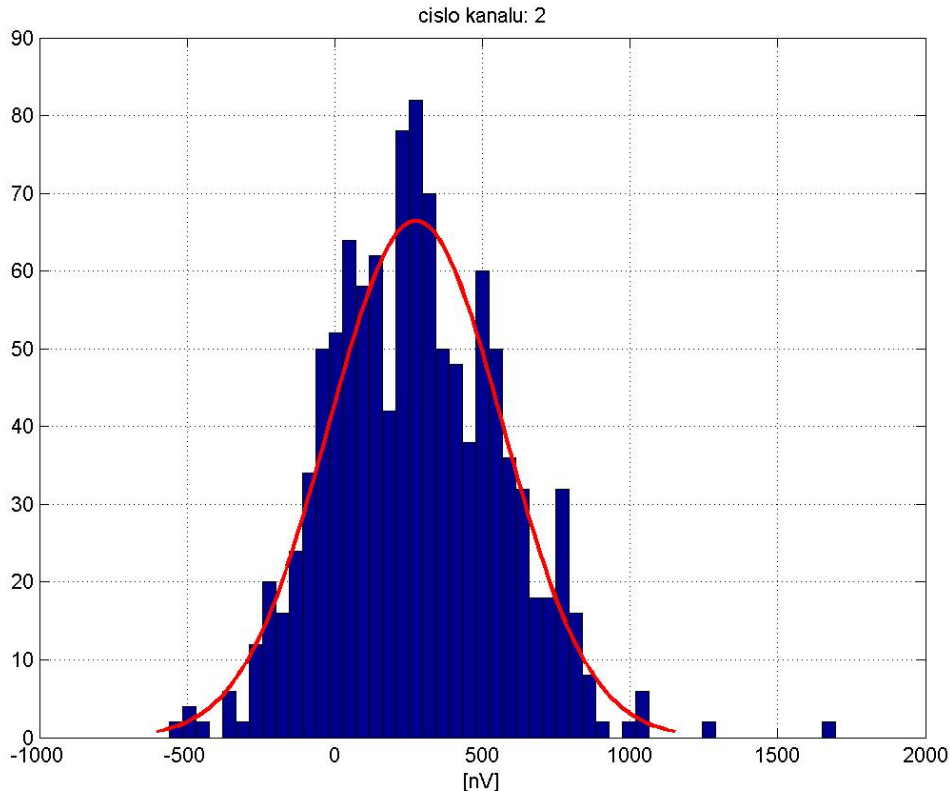
Tím se získá více hodnot ke každé referenci, takže se může porovnat přesnost měření.

8 MĚŘENÍ ZSR

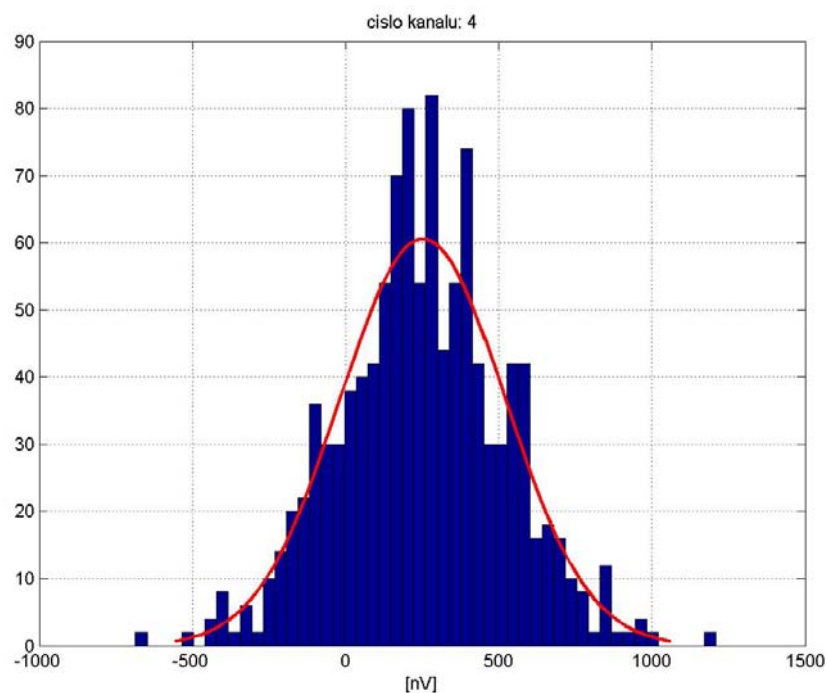
Během této práce jsem provedl měření hodnot Zenerových referencí s vysokým počtem opakování měření kvůli statistické analýze, pomocí mnou vytvořeného programu *Etalony ZRS* v LabView. Popis tohoto programu je uveden v kapitole 7.1 *Měření ZRS v LabView*. Programem *Etalony ZRS* byly změřeny Zenerovy reference na kanálech skeneru (čísla 2, 4, 5, 6, 10, 11, 12, 13, 21, 22, 28). Tyto kanály byly vybrány, protože na nich byly zapojeny 10V svorky Zenerových referencí. Měření probíhalo v automatickém režimu a trvalo přibližně 15 hodin. Tato poměrně dlouhá doba měření byla způsobena opakovanými sériemi měření a časovými prodlevami kvůli ustálení termoelektrického napětí, které by mohlo vzniknout. Pro každý kanál skeneru bylo provedeno 1100 měření.

Výsledky měření byly zpracovány vytvořeným programem v prostředí Matlab. Tento program je popsán v kapitole 7.2 *Zpracování dat v prostředí Matlab*.

Na níže uvedených obrázcích 21, 22 jsou pro ukázkou zobrazeny vypočtené hodnoty offsetu na kanálech 2 a 4 ve formě histogramu a proložené Gaussovou křivkou. Z uvedeného histogramu vyplývá, že se jedná o normální rozdělení, které má tvar Gaussovy funkce, což odpovídá předpokladu. Z toho lze usuzovat, že počet měření byl dostatečný.



Obrázek 21: Histogram offsetu na kanálu 2.



Obrázek 22: Histogram offsetu na kanálu 4.

V tabulkách 3 a 4 jsou vyneseny vypočtené hodnoty offsetu pro vybrané kanály skeneru, v první tabulce hodnoty vypočtené z měření ZRS, v druhé tabulce pomocí JVS. V tabulce je uvedena daná hodnota offsetu a k ní její nejistota u_A nebo rozptyl.

Tabulka 3: Hodnoty offsetu kanálů a nejistoty vypočtené pomocí programu Matlab ze ZRS.

Skener kanál	Offset \bar{P}_{ZRS} [nV]	$u_A(\bar{P})$ [nV]	Počet měření n
2	274.59	8.81078	1100
4	251.79	8.12019	1100
5	224.6	10.74	1100
6	237.47	11.1398	1100
10	218.7	9.13981	1100
11	206.52	10.8194	1100
12	200.12	8.15845	1100
13	236.39	10.4869	1100
21	220.45	10.8125	1100
22	240.56	9.75703	1100
28	272.82	9.40876	1100

Tabulka 4: Hodnoty offsetu kanálů a jejich rozptyl změřené pomocí JVS.

Skener kanál	Offset \bar{P}_{JVS} [μV]	Rozptyl δ [μV]
2	0.057	0.0088089
4	-0.026	0.0057656
5	-0.018	0.017426
6	-0.009	0.0059409
10	-0.001	0.0096211
11	-0.012	0.0099699
12	-0.058	0.014454
13	-0.044	0.0086078
21	0.08	0.030186
22	0.031	0.022481
28	1.458	0.20593

Mnou vypočtené hodnoty úbytků na kanálu skeneru neodpovídají hodnotám naměřeným pomocí JVS. Příčinou může být, že v modelu měření pravděpodobně nebyly zahrnuty všechny vlivy (offsety) vstupující do měření.

V níže uvedených tabulkách jsou uvedeny hodnoty odchylek referencí připojených na daný kanál skeneru. Odchylka reference ΔU_x znamená, o kolik se reference odchyluje od definovaného napětí 10V. Napětí reference U_x se tedy vypočítá pomocí odchylky referene ΔU_x podle vzorce (8.1). V tabulce 5 jsou vyneseny hodnoty odchylek reference ΔU_x pomocí stávajícího programu na ČMI Voltref. V tabulce 6 jsou vyneseny hodnoty odchylek referencí ΔU_x pomocí mého měření. Je vidět, že hodnoty se mění jen v desetinách mikrovoltů, což může být způsobeno i samotným šumem referencí.

$$U_x = 10 + \Delta U_x \quad (8.1)$$

U_x - napětí reference [V],

ΔU_x - odchylka reference [V].

Tabulka 5: Hodnoty referencí změřené pomocí programu na ČMI Voltref.

Skener kanál	Odchylka reference [μV]
2	-56.85
4	-67.9
5	-64.3
6	-77.4
10	-3.1
11	-3.7
12	-68.8
13	-60.4
14	190.3
21	-6.6
22	-3.7
28	-90.0

Tabulka 6: Hodnoty referencí změřené pomocí mého programu.

Skener kanál	Odchylka reference [μV]
2	-56.85
4	-67.9
5	-64.5
6	-77.7
10	-2.9
11	-3.5
12	-68.9
13	-60.4
14	190.4
21	-6.5
22	-3.3
28	-89.5

Měření bylo ověřeno výpočtem jednotlivých hodnot referencí, které lze srovnat s výsledky získanými ze stávajícího programu na ČMI Voltref.

9 ZÁVĚR

Metrologie má zásadní význam pro vědecký výzkum, opačně ale také platí, že vědecký výzkum je nezbytný pro její rozvoj.

Moje práce se zabývá metrologií se specializací na stejnosměrné napětí. Uvedeno je tu shrnutí druhů primárních etalonů, se kterými se můžeme setkat v metrologické praxi. Jsou zde popsány fyzikální principy využívané pro jednotlivé druhy etalonů stejnosměrného napětí, zejména Josephsonův jev, Zenerovy diody a Westonovy články. Blíže je popsán referenční etalon využívající Zenerovy diody.

K udržení stejnosměrného napětí se provádí pravidelné porovnávání a měření rozdílů napětí mezi jednotlivými ZRS. Je třeba určovat hodnoty referencí, které lze vypočítat pomocí hodnot naměřených pomocí negativní metody. V této metodě se provádí měření každý s každým, a pokud budeme znát absolutní hodnotu jedné reference, můžeme pomocí ní dopočítat hodnoty ostatních referencí. Tyto hodnoty jsou zaznamenávány v časovém sledu.

V rámci diplomové práce jsem se seznámil s měřením primárních etalonů napětí. Je tu popsána metoda porovnání měření dvou stejnosměrných etalonů napětí pomocí skeneru (Zenerových referencí). Jedná se o negativní metodu, která využívá malého rozdílu mezi dvěma články zapojenými negativně do série. Vytvořil jsem teoretický model měření, z kterého jsem vypočítal parametr $2P$, což je nežádané konstantní napětí. Tuto hodnotu je důležité vyčíslit kvůli určení nejistoty měření a kontrole měření, zůstává-li tato hodnota stálá. Stálost této hodnoty je důležitá z důvodu propojení s JVS pomocí skeneru.

Pro vytvoření model měření jsem provedl rozbor vstupujících nejistot. Uvažoval jsem tyto vstupující nejistoty: chyba nanovoltmetru (udávaná výrobcem), nejistota statistickou analýzou u_A a úbytek napětí na přívodních kabelech U_a . Nejvíce ovlivňující chyby jsou chyba nanovoltmetru a statistická chyba, nevýznamnou chybou je úbytek napětí na přívodních kabelech.

V této práci jsem používal programy LabView a Matlab. Tyto programy byly vybrány pro jejich dostupnost na ČMI a také pro jejich jednoduchost při řešení daného úkolu. Pro měření jsem použil program LabView a pro výpočet dat z naměřených hodnot program Matlab.

Hlavním cílem této práce bylo stanovení offsetů na kanálech skeneru pomocí měření ZRS a srovnání těchto hodnot s měřením pomocí JVS. Výsledky měření se liší, z čehož se dá usuzovat, že v modelu měření nebyly pravděpodobně zahrnuty všechny vlivy (offsety). Šum Zenerových referencí je větší než offset kanálu skeneru. Tato vstupující chyba by se měla dát potlačit velkým počtem měření. I když byl použit dostatečný počet měření, předpokládám vliv na velikosti offsetu kanálu skeneru. Tento šum nevstupuje do výsledných hodnot při měření pomocí JVS.

Je nutno vypočítat offsety kanálů skeneru z každodenního automatického měření ZRS, jelikož měření offsetů pomocí JVS je pracné a zdlouhavé. Toto měření je nutné z důvodu propojení JVS se skenerem a tím by Zenerovy reference mohly být měřeny automaticky s JVS.

Při měření offsetů kanálů skeneru pomocí JVS je tato hodnota stabilní (měřeno z dlouhodobého měřítka).

Opravdové výsledky by se ukázaly až po dlouhodobém měření (po roce). Z tohoto měření by bylo vidět, jak se offsety kanálů skenerů mění v čase.

Tato práce má časově ulehčit při měření referencí stejnosměrných napětí a změřit hodnoty etalonů stejnosměrného napětí a stanovit offsety kanálů na skeneru.

Použitá literatura

- [1] Metrologie v kostce [online]. Druhé vydání. [ČR] : Sdělovací technika, 2003 [cit. 2010-05-01]. Dostupné z WWW: <<http://www.cmi.cz/download.php?wdc=507>>.
- [2] BOHÁČEK, Jaroslav. Metrologie elektrických veličin. Vyd.1. Praha : ČVUT, 1994. 238 s.
- [3] MOHR, Peter ; TAYLOR, Barry; NEWELL, David. CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2006 [online]. Gaithersburg(Maryland) : NIST, 2007 [cit. 2010-05-01]. Dostupné z WWW: <<http://physics.nist.gov/cuu/Constants/codata.pdf>>.
- [4] MACHÁČ, Jiří. Metrologie elektrického napětí [online]. Praha : VSCHT, [2008]. 10 s. Učebnicový text. VSCHT,ÚFMT. Dostupné z WWW: <http://www.vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/machacj/docs/MET_EL_2.pdf>.
- [5] MACHÁČ, Jiří. Etalony [online]. Praha : VSCHT, [2008]. 11 s. Učebnicový text. VSCHT,ÚFMT. Dostupné z WWW: <<http://www.vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/machacj/docs/ETALON-1.pdf>>.
- [6] POWER, Oliver; WALSH, James. The use of within-group comparison of an ensemble standard to investigate the humidity dependence of electronic voltage standards. Elsevier : Measurement. 2004, č. 36, s. 155-162.
- [7] TECHNICAL NOTE 430. Designs for Surveillance of the Volt Maintained by a Small Group of Saturated Standard Cells. W.Eicke,J.Cameron. Washington : Government Printing Office Washington, 1967. 22 s.
- [8] TROJAN, Martin. Standardní nejistoty měření : Standard Uncertainty in Measurement. Brno : Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. Bakalářská práce. Vedoucí práce Marie Havlíková.
- [9] VLACH, Jaroslav; HAVLÍČEK, Josef; VLACH, Martin et al. Začínáme s LabVIEW. 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2008. 247 s. ISBN 978-807-3002-459.
- [10] TŮMOVÁ, Olga. Metrologie a hodnocení procesů. 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2009. 231 s. ISBN 978-807-3002-497.

- [11] Servis Manual. Model 2182 Nanovoltmetr. Cleveland, Ohio, U.S.A. : Keithley Instruments, Inc., 1998. 114 s.
- [12] User's handbook. The Datron 4910 and 4911 : DC voltage reference standards. Indianapolis, Indiana, U.S.A. : Datron Instruments, Inc , 1990. 74 s.

Seznam obrázků a tabulek:

Tabulka 1: Obory, podobory a typické etalony pro jednotlivé důležité úrovně měření. Pro informaci uveden jen obor „Elektřina a magnetismus“. [1]	13
Tabulka 2: Odvozené jednotky SI se zvláštním pojmenováním a značkou. [1]	14
Obrázek 1: Znázorňuje tzv. „elektrický trojúhelník“. Propojuje jednotky elektrických veličin se základními fyzikálními konstantami na základě konkrétních fyzikálních jevů. [1]	16
Obrázek 2: Stabilizátor se Zenerovou diodou a jeho VA charakteristika. [4]	18
Obrázek 3: Typy Josephsonových kontaktů: a) tunelový spoj, b) hrotový kontakt, c) můstkový spoj. [2]	19
Obrázek 4: Výsek volt-ampérové charakteristiky Josephsonova přechodu ozářeného mikrovlnným zářením. [4]	20
Obrázek 5: Schematické zapojení pro srovnání skupin etalonů napětí. [6]	22
Obrázek 6: Dvě možnosti jak mohou být články spojeny v sérii. [7]	25
Obrázek 7: Schéma zapojení měření pro měření s Josephsonovým etalonem.	26
Obrázek 8: Schéma zapojení měření pro dva články.	27
Obrázek 9: Náhradní schéma přívodního kabelu.	33
Obrázek 10: Úbytek napětí U_a na přívodním kabelu, náhradní schéma.	35
Obrázek 11: Blokové schéma programu <i>Etalony ZSR</i>	38
Obrázek 12: Podprogram <i>Main</i>	39
Obrázek 13: Zadávání parametrů ZSR	40
Obrázek 14: Podprogram <i>Zadávání parametrů ZSR</i>	41
Obrázek 15: Ukázka vytvoření matice kombinací kanálů.	42
Obrázek 16: Postup při měření ZSR.	42
Obrázek 17: Podprogram <i>Měření ZSR</i>	43
Obrázek 18: Podprogram <i>Výpočet průměrné hodnoty a nejistoty u_A</i>	43
Obrázek 19: Podprogram <i>Převod čísla na text plus čas</i>	44
Obrázek 20: Blokový diagram měření ZRS.	45
Obrázek 21: Histogram offsetu na kanálu 2.	46
Obrázek 22: Histogram offsetu na kanálu 4.	47
Tabulka 3: Hodnoty offsetu kanálů a nejistoty vypočtené pomocí programu Matlab ze ZRS.	47
Tabulka 4: Hodnoty offsetu kanálů a jejich rozptyl změřené pomocí JVS.	48
Tabulka 5: Hodnoty referencí změřené pomocí programu na ČMI Voltref.	49
Tabulka 6: Hodnoty referencí změřené pomocí mého programu.	49